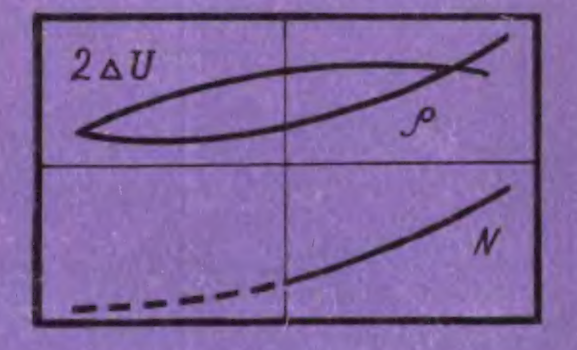
П. С. ЛИВШИЦ

СКОЛЬЗЯЩИЙ КОНТАКТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН





П. С. ЛИВШИЦ

СКОЛЬЗЯЩИЙ КОНТАКТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

(СВОЙСТВА, ХАРАКТЕРИСТИКИ, ЭКСПЛУАТАЦИЯ)



«ЭНЕРГИЯ»
МОСКВА 1974

6П2.1.08
Л55
УДК 621.313.066.6

Лившиц П. С.

Л55 Скользящий контакт электрических машин (свойства, характеристики, эксплуатация), М., «Энергия», 1974.

272 с. с ил.

В книге обобщены результаты работ по обеспечению надежной эксплуатации скользящего контакта коллекторных электрических машин и электрических машин с контактными кольцами.

Рассмотрены специальные вопросы прохождения тока в скользящем контакте и описан подбор щеток для электрических машин, используемых на электростанциях, предприятиях металлургической промышленности, железнодорожном, авиационном и автомобильном транспорте и в других отраслях народного хозяйства. Показано, как решается аналогичная задача в промышленности ГДР, ЧССР, ПНР, Англии, Франции, Японии и ФРГ.

Книга предназначена для инженерно-технических работников и квалифицированного персонала, занятых изготовлением, ремонтом, наладкой, испытанием и эксплуатацией электрических машин.

Л $\frac{30307\text{-}175}{051(01)\text{-}74}$ 112-73 6П2.1.08

ПАВЕЛ СЕРГЕЕВИЧ ЛИВШИЦ

Скользящий контакт электрических машин
(свойства, характеристики, эксплуатация)

Редактор М. Д. Белкин
Редактор издательства М. И. Николаева
Переплет художника П. П. Перевалова
Технический редактор Н. А. Галанчева
Корректор Н. В. Лобанова

Сдано в набор 21/III 1973 г. Подписано к печати 26/XII 1973 г. Т-19686
Формат 84×108[1]/32 Бумага типографская № 2
Усл. печ. л. 14,28 Уч.-изд. л. 16,83
Тираж 8 000 экз. Зак. 2 Цена 95 коп.

Издательство «Энергия». Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Набрано в Московской типографии № 10 Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Отпечатано во Владимирской типографии Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли г. Владимир, ул. Победы, д. 18б.

ПРЕДИСЛОВИЕ

В деле обеспечения надежной эксплуатации современных коллекторных электрических машин и машин с контактными кольцами совершенно исключительная роль принадлежит элементам, обеспечивающим прохождение тока между взаимоперемещающимися частями этих машин. Особенность работы названных элементов, образующих скользящий электрический контакт, состоит в том, что она обусловлена действием значительного количества различных факторов, одна часть которых заложена собственно в машинах, а другая находится вне машин. Первая часть упомянутых факторов связана с расчетом и проектированием электрических машин, технологией их изготовления и используемыми материалами. Вторая часть обусловлена режимами эксплуатации машин и состоянием среды, в которой эта эксплуатация осуществляется. Взаимодействие перечисленных факторов таково, что правильно рассчитанная, хорошо построенная и надлежащим образом отрегулированная коллекторная электрическая машина может перестать удовлетворительно работать только потому, что в составе окружающей ее атмосферы абсолютное содержание водяного пара оказалось меньше 1—3 г/см^3, или потому, что в составе этой атмосферы на 1 млн. частей воздуха приходится 10 частей кремнийсодержащих веществ. Наряду с указанным можно, естественно, привести и такие примеры, когда удовлетворительное состояние окружающей среды не гарантирует надлежащую эксплуатацию электрооборудования из-за дефектов расчета и изготовления, приведших к расстройству режима работы скользящего контакта. Из изложенного следует, насколько существенно и важно для практики эксплуатации электрооборудования изучение различных обстоятельств, влияющих на характеристики используемого в нем контакта. Необходимость подобного изучения ощущалась на всех этапах развития электромашиностроения. Между тем знакомство с историей этого развития и с современным состоянием вопроса обнаруживает существование значительной диспропорции между степенями изученности

различных факторов, влияющих на работу электрического скользящего контакта. Если одни из них изучены настолько полно, что поддаются вполне строгому количественному учету, то закономерности, определяющие влияние других, описаны только в самом общем виде. Как всегда бывает в последней ситуации, отсутствие основополагающей руководящей идеи приводит к необходимости рассмотрения большого числа частных случаев. Именно в подобном положении находится изучение влияния на характеристики скользящего контакта состояния окружающей среды, материала контактных элементов, вводимых в эти материалы легирующих добавок и пропитывающих веществ, температуры, давлений и ряда других показателей. Изучению влияния этих показателей на характеристики электрического скользящего контакта посвящено значительное количество исследований, опубликованных в самых различных изданиях. Особенность этих публикаций состоит в том, что они касаются отдельных частных вопросов проблемы и не объединены каким-либо руководящим принципом. Методическая особенность предлагаемой вниманию читателей книги состоит в том, что в ней предпринята попытка связать характеристики скользящего контакта с составом материалов, из которых изготовлены образующие его элементы, и рассмотреть изменения этих характеристик в зависимости от влияния факторов, определяемых как собственно электрической машиной, так и состоянием среды, в которой она эксплуатируется. Использованные автором многочисленные источники информации следует рассматривать как составные части коллективного эксперимента, конечной целью которого является создание общей теории работы скользящего контакта электрических машин. Автор отдает себе отчет в том, что в настоящем труде конечной цели полностью достичь еще не удалось. Тем не менее определенные результаты на пути к достижению этой цели уже получены и их использование в практике наладки и эксплуатации коллекторных электрических машин и машин с контактными кольцами принесет несомненную пользу.

Книга рассчитана на четыре категории читателей. Первую из них, наиболее многочисленную, составят инженерно-технические работники и квалифицированный персонал, занятые ремонтом, наладкой и эксплуатацией электрических машин в самых различных отраслях

народного хозяйства. Вторую категорию составят специалисты, проектирующие и изготавливающие электрические машины; третью — работники электроугольной промышленности, разрабатывающие и выпускающие электрощетки; четвертую категорию составят специалисты, проявляющие интерес к узкоспециальным вопросам теории и практики эксплуатации скользящего контакта в электромашиностроении.

Автор выражает уверенность в том, что читатели, которым адресовано настоящее издание, найдут в нем немало полезных сведений, использование которых позволит повысить надежность работы электрооборудования, эксплуатируемого в самых различных отраслях народного хозяйства.

В заключение несколько слов о принятой в настоящей книге системе единиц измерений. Для устранения существующего в различных странах многообразия этих единиц XI Генеральная конференция по мерам и весам (Париж, октябрь 1960 г.) приняла международную систему единиц (Systeme international), сокращенно обозначенную литерами СИ (SI). К настоящему времени многие страны ввели единицы системы СИ в качестве обязательных и число таких стран непрерывно возрастает. Внедряется эта система и в СССР. Впервые ее узаконил в нашей стране ГОСТ 9867-61. После ряда усовершенствований и дополнений Комитет стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР в 1970 г. опубликовал окончательную редакцию проекта государственного стандарта «Единицы физических величин», предписания которой в настоящей книге и использованы. Для преодоления затруднений, возникающих у читателя при восприятии цифровых данных, наряду с единицами Международной системы в скобках указаны единицы измерения в системах, применявшихся ранее. Кроме того, в приложении I приведены переводные коэффициенты для перевода старых единиц измерений в единицы СИ. Принятые в книге округления при соответствующих перерасчетах дают ошибку, не превосходящую 2%; для рассматриваемых задач подобная ошибка вполне допустима. В книге применены также кратные и дольные единицы, образованные с помощью десятичных приставок, например, «гПа» — гектопаскаль (100 паскалей); «сН» — сантиньютон (0,01 ньютона) и др.

ВВЕДЕНИЕ

Развитию электромашиностроения всегда уделялось особое внимание, и в настоящее время оно является одной из передовых и наиболее организованных отраслей промышленности всякой индустриально развитой страны. Подобное положение достигнуто в результате работ выдающихся ученых, экспериментаторов, изобретателей и организаторов производства, чьими творческими усилиями осуществлялись становление и прогрессирующее развитие различных отраслей деятельности, связанных с разработкой теории, конструкций и совершенствованием производства электрических машин. У истоков этого процесса, начавшегося в первой четверти прошлого века, стояли М. Фарадей, доказавший возможность превращения электрической энергии в механическую (1821 г.), открывший явление электромагнитной индукции (1831 г.) и построивший первый магнитоэлектрический генератор (1831 г.), член Петербургской академии наук Б. С. Якоби, впервые создавший электродвигатель с непосредственным вращением якоря (1834 г.), коллектор для выпрямления тока, речной бот с электрическим приводом (1838 г.) и открывший появление обратной э. д. с. при вращении якоря; член Петербургской академии наук, ректор Петербургского университета Э. Х. Ленц, которым обобщен и сформулирован закон магнитной индукции (закон Ленца), доказан принцип обратимости электрических машин (1838 г.), опубликована первая в мире работа по исследованию магнитоэлектрической машины, установлено и правильно объяснено явление реакции якоря. Работы пионеров электротехники и электромашиностроения успешно были продолжены во второй половине XIX в. В 1860 г. А. Пачинотти создает электродвигатель с кольцевым якорем;

Г. Уайльд в 1863 г. строит электрическую машину с независимым возбуждением, а еще через 4 года появляется первая электрическая машина с самовозбуждением. В 1870 г. З. Грамм применяет кольцевой якорь при сооружении электрического генератора; в 1872 г. Ф. Гефнер-Альтенек изобретает барабанный якорь; десять лет спустя, в 1882 г., Т. Эдисон сооружает первую электрическую станцию общественного пользования с подземной канализацией электроэнергии. В 1888 г. Г. Феррарис открывает принцип вращающегося магнитного поля, М. О. Доливо-Добровольский изобретает систему трехфазного тока, а Н. Тесла получает патент на электродвигатель многофазного тока и строит двухфазный асинхронный электродвигатель. Через год, в 1889 г., М. О. Доливо-Добровольский изобретает трехфазный асинхронный двигатель, а еще через несколько лет, в 1899 г., Э. Арнольд разрабатывает теорию коммутации электрических машин, которую в настоящее время называют классической и в основе которой лежит представление о постоянстве удельного переходного сопротивления в скользящем контакте ($\Delta r_{щ}=\text{const}$).

В текущем столетии работы по развитию электромашиностроения приобрели принципиально новый характер. На смену ученым-одиночкам пришли мощные хозяйственные и научно-исследовательские организации, объединившие целые коллективы исследователей и организаторов промышленности. В нашей стране талантливыми руководителями научных школ, разрабатывавших теоретические вопросы электромашиностроения, и выдающимися организаторами электромашиностроительной промышленности являлись академики АН СССР Г. М. Кржижановский и К. И. Шенфер, академик АН УССР В. М. Хрущев, члены-корр. АН СССР М. А. Шателен и К. А. Круг, профессора Д. В. Ефремов, П. Л. Калантаров, В. Т. Касьянов, С. И. Курбатов, Л. М. Пиотровский, В. А. Толвинский и многие другие. В результате к настоящему времени созданы теория работы и методы расчета электрических машин самых различных мощностей и назначений. В основе разработанных методов лежат точные количественные соотношения, позволяющие рассчитывать магнитные и электрические цепи машин, их пусковые, регулировочные, рабочие, тепловые и прочие характеристики. Эта отлично систематизированная и достаточно строгая схема расче-

та охватывает все части и детали электрических машин за исключением тех, которые участвуют в образовании электрического скользящего контакта. Физико-химические процессы, происходящие в зоне этого контакта, подвергающиеся влиянию окружающей среды, оказались настолько сложными, что до сих пор не удалось создать достаточно стройную теорию, позволяющую производить количественную оценку происходящих в скользящем контакте явлений. Вследствие указанного обстоятельства в практике эксплуатации возникают случаи, когда элементы скользящего контакта рассчитанной по оптимальному варианту, хорошо построенной и правильно отрегулированной электрической машины начинает плохо работать только потому, что в составе окружающей ее атмосферы на 1 млн. частей воздуха приходится 10 частей кремнийсодержащих веществ.

Приведенный пример, характеризующий влияние внешней среды на работу скользящего контакта электрических машин, является далеко не единственным. Период зарождения высотной авиации дал немало других примеров нарушения работоспособности скользящего контакта электрооборудования высотных летательных аппаратов, причем эти нарушения были столь значительными, что делали невозможной эксплуатацию названных аппаратов в условиях высоты.

Описанные примеры заимствованы из практики эксплуатации электрических машин в течение последних двух-трех десятилетий. Много других примеров воздействия на электрический скользящий контакт различных факторов можно найти на протяжении почти всего периода его развития. Так, уже в 1834 г. Б. С. Якоби, создавая свой электродвигатель с вращающимся якорем, особое внимание уделил разработке коммутирующего устройства, явившегося прообразом современного коллектора и электрощеток. Предложения, имевшие целью усовершенствовать работу электрического скользящего контакта, вносили У. Стерджен (1834 г.), В. Кайданов (1839 г.), З. Грамм (1870—1872 гг.), Т. Эдисон (1880 г.), О. Шульц (1884 г.), Фешингер (1888 г.), Пфейлер (1890 г.), К. Кох (1892 г.) и Л. Будро (1895 г.). Все перечисленные авторы задачу повышения работоспособности электрического скользящего контакта решали путем совершенствования конструкции образующих его элементов. Материал коллекторов и электрощеток оставался все время неизменным: при изготовлении первых, применялась медь, а при изготовлении вторых — медь или ее сплавы. Основным наблюдавшимся в то время недостатком подобной контактной пары являлся интенсивный износ. Для устранения этого недостатка Л. Будро, использовав разработанный еще в 1826 г. П. Г. Соболевским метод изготовления изделий из прессованных порошков, сделал в 1895 г. заявку на электрощетки, спрессованные из бронзового порошка. Подобный способ изготовления электрощеток в первоначальном варианте оказался малоэффективным, однако идея изготовления электрощеточных материалов методами порошковой металлургии и угольной керамики оказалась весьма плодотворной. Весь последующий период совершенствования характеристик скользящего контакта электрических машин связан с использованием электрощеточных материалов, изготовленных этими методами. В период 1900—1927 гг., решая задачу повышения коммутирующих свойств и снижения износа элементов электрических скользящих контактов, промышленность последовательно создает все известные в настоящее время классы рассматриваемых материалов: металлографитный (1900 г.), угольно-графитный, графитный и электрографитированный (патент фирмы Шунк и Эбе, 1927 г.). Решающую роль в создании этих материалов сыграли предприятия, на которых в то время изготавливались угольно-графитные изделия электротехнического назначения (электроды химических источников тока, «свечи Яблочкова», стержни накала газонаполненных стеклянных ламп, сварочные электроды и т. п.). В России это были заводы в Кинешме и Подмосковье, основанные соответственно в 1878 и 1899 г. Несколько ранее аналогичные заводы были созданы в некоторых западноевропейских странах.

Наряду с созданием новых конструкций и материалов для элементов электрических скользящих контактов осуществлялось изучение показателей, характеризующих их совместную работу. Помимо уже упоминавшихся характеристик износа и коммутационной характеристики изучению стали подвергаться и другие характеристики. В 1895—1905 гг. опубликован ряд статей, посвященных рассмотрению физических процессов в контакте, механическому взаимодействию его элементов, переходному падению напряжения в нем и другим вопросам.

Не претендуя на исчерпывающую характеристику работ этого периода *, отметим те из них, которые для своего времени были наиболее значительными и которые упоминаются в последующих исследованиях. К их числу относятся работа Е. В. Кокса и Г. В. Бьюка, в которой была установлена зависимость сопротивления угольных контактов и коэффициента трения от удельного давления и окружной скорости (1895 г.); работа В. М. Мордея о роли электрощетки в коммутационном процессе (1897 г.); работа Э. Арнольда, в которой впервые были установлены факт уменьшения сопротивления скользящего контакта при повышении плотности тока в нем, неравенство переходного падения напряжения под различным образом поляризованными электрощетками и влияние на эти показатели температуры (1899 г.), а также работы А. С. Меера (1901 г.), М. Кана (1902 г.), А. Пренцлина (1902 г.), К. Гцайя (1903 г.), М. Латора (1904 г.), Ф. Пунга (1905 г.) и др. В результате выполнения перечисленных исследований к 1902—1905 г. уже были сформулированы некоторые общие представления о характеристиках совместной работы элементов электрического скользящего контакта применительно к существовавшим в то время электрощеточным материалам. Так, уже в то время считали, что статические вольт-амперные характеристики металлсодержащих электрощеток определяются плотностью тока в скользящем контакте и изменяются в зависимости от нее по закону прямой линии, т. е. по уравнению $2\Delta U = kj$. Вольт-амперные характеристики угольных электрощеток в значительном интервале остаются неизменными, т. е. подчиняются закону $2\Delta U = \text{const}$. Переходное падение напряжения на пару электрощеток распределяется неравномерно под электрощетками разной полярности и мало зависит от частоты вращения коллектора, но при его остановке резко изменяет характер зависимости от j. На величину $2\Delta U$ оказывают влияние состояние поверхности скольжения коллектора или кольца, их температура, химическая активность, удельное давление на электрощетки и механические вибрации.

* Библиографические справки о работах по электрическим контактам (в том числе и скользящим), опубликованных в 1835—1943 гг., составлялись Комитетом Б-4 американского общества испытания материалов. Первое издание упомянутой библиографии (Bibliography Abstracts on Electrical Contacts) вышло в 1943 г. В последующем к библиографии издавались дополнения (Supplements tu the Bibliography Abstracts on Electrical Contacts), в которых производились справки о работах, опубликованных в 1943—1953 гг. С переводами этих изданий можно познакомиться в Ленинградской публичной библиотеке им. Салтыкова-Щедрина, где они числятся под индексом «Зазаз № 40/20».

Все описанные исследования подготовили почву для дальнейшего развития работ в области скользящего контакта. Удовлетворяя все возраставшие требования непрерывно развивающейся промышленности, теория и практика электромашиностроения решали все новые и новые задачи. В 1920—1930 гг. уже существовала достаточно обширная литература, освещавшая результаты многочисленных исследований в рассматриваемой области. В эти годы широкую известность получили работы К. И. Шенфера, Ю. В. Буткевича, С. Б. Юдицкого, Р. Хольма, А. Шлипака, Ф. Шретера, В. Гейнриха, И. Нейкирхена и др. В эти годы расширялась номенклатура марок электрощеточных материалов, выпускаемых промышленностью различных стран. Выпускаемые материалы относились к упомянутым четырем классам.

Последующий период времени характеризуется расширением круга лиц, участвующих в решении проблемы электрического скользящего контакта. Вслед за технологами, разрабатывавшими новые рецептуры и процессы изготовления контактных материалов, исследованием различных аспектов проблемы начинают заниматься представители других специальностей. Особенно интенсивное развитие этого процесса происходит в 1940—1950 гг. в связи с появлением высотных летательных аппаратов. Специфические условия работы электрооборудования в высотной атмосфере потребовали создания скользящих контактов с принципиально новыми свойствами. Осуществляемая во всех отраслях промышленности интенсификация производственных процессов и создание высокоиспользуемых электрических машин с кремнийорганической изоляцией предъявили к скользящим контактам новые требования. Исследованиями были охвачены теория и методы расчета электрических, машин, технология их производства, рецептуры и технология изготовления контактных материалов, и физикохимия процессов, происходящих в контактной зоне, механика взаимодействия контактирующих элементов и другие вопросы. Об интенсивности проведенных работ можно судить по таким фактам: за время с 1940 по 1966 г. в СССР, США, Англии, Франции, ФРГ и Италии было

выдано 109 патентов, относящихся только к одному из возможных способов повышения эксплуатационных свойств электрощеток путем введения в них пропитывающих веществ. Согласно данным, сообщенным на первой конференции фирмы «Морганайт», посвященной электрощеточным проблемам за десятилетие с 1950 по 1960 г. по вопросам, относящимся к электрощеткам, было опубликовано в 15 тыс. раз больше работ, чем за предыдущие 100 лет *. Для изучения и объяснения происходящих в скользящих контактах явлений начали привлекаться идеи и методы физики полупроводников, радиоэлектроники, физической химии, тонкой химической технологии, математической статистики и других отраслей знания. Естественно, что вся получаемая при этом информация публиковалась в периодических изданиях, монографиях, книгах и диссертациях самых различных направлений. В результате сколько-нибудь полное знакомство со всеми аспектами проблемы электрического скользящего контакта для широкого круга интересующихся ею лиц оказалось весьма затруднительным. Для того чтобы устранить указанные трудности в получении информации о скользящих контактах и написана настоящая книга. При ее создании автор не ставил себе целью составление обзора изданной литературы по рассматриваемому вопросу. Задача автора состояла в том, чтобы систематизировать основные, направляющие идеи в рассматриваемой области и попытаться наметить пути, по которым может пойти дальнейшее обобщение накопленных практикой факторов. При этом, естественно, в работе нашла отражение развиваемая автором в течение ряда лет точка зрения о зависимости характеристик скользящего контакта от состава материалов, из которых изготовлены образующие его элементы.

Автор стремился изложить не сборник готовых рецептов по наладке работы узла токосъема, а дать последовательное освещение современных представлений о физике процесса прохождения тока в скользящем контакте и об используемых для описания этих процессов характеристиках контакта. На основе описанных представлений излагаем практические приемы повышения надежности работы скользящего контакта электрических машин.

* См. «Труды первой конференции фирмы «Морганайт» по угольным щеткам». Лондон, 1961.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ СКОЛЬЗЯЩИЙ КОНТАКТ. КОНТАКТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИХ СВОЙСТВА

Основное назначение электрического скользящего контакта состоит в том, чтобы обеспечивать возможность прохождения тока между взаимоперемещающимися частями электрических машин, приборов и аппаратов. В современной технике электрические скользящие контакты конструктивно выполняются в виде узлов «электрощетка — коллектор», «электрощетка — контактное кольцо», «троллейный провод — лыжа пантографа» и других подобных устройств. В процессе работы этих устройств между составляющими их конструктивными элементами кроме передачи тока происходит еще ряд других взаимодействий. Среди них главнейшими являются трение, взаимное изнашивание, нагревание и химические реакции. В наиболее полной мере перечисленные взаимодействия проявляются в контакте типа «электрощетка — коллектор», в котором электрощетки двух разных полярностей размещены на коллекторе по одному следу (дорожке). По указанной причине этому типу контакта в последующем изложении и будет уделено основное внимание. Наряду с этим в отдельных местах изложения речь будет идти также и о контакте типа «электрощетка — контактное кольцо». Принципиальной особенностью подобного контакта является размещение электрощеток разной полярности на разных следах.

Анализ различных этапов развития скользящего контакта типа «электрощетка — коллектор» показывает, что за всю свою почти 140-летнюю историю он подвергался постоянным изменениям [Л. 1-1—1-4]. Изменения касались как конструктивного оформления элементов контакта, так и материалов, из которых эти элементы изготавливались. Оба вида изменений всегда оказывали

влияние на характеристики совместной работы элементов скользящего контакта, однако наиболее полным и существенным это влияние было тогда, когда изменялся материал электрощеток. Если на первых электрических машинах 1832—1833 гг. скользящий контакт осуществлялся с помощью ртутных токосъемных устройств, то в 1834—1895 гг. в качестве материала для элемента скользящего контакта, названного впоследствии электрощеткой, применялась компактная (литая) медь или ее сплавы. Начиная с 1895 г. электрощетки начали изготавливать методами порошковой металлургии, прессуя их из порошков бронзы. Подобные электрощетки не обеспечивали удовлетворительную работу узла токосъема и в процессе их совершенствования с 1900 г. начали использовать композиции, состоящие из диспергированных медных и углеродистых порошков. Описанные здесь так называемые металлсодержащие «цветные» электрощеточные материалы не могли удовлетворить потребности стремительно развивавшейся электротехнической промышленности, и вскоре начался выпуск электрощеток, материал которых состоял из смеси натурального графита и некоторых других углеродистых веществ («черные» материалы). В зависимости от соотношения перечисленных компонентов состава были получены материалы двух классов: графитный и угольно-графитный. В 1927 г. угольно-графитные материалы начали подвергать процессу электрографитации, в результате чего появился новый класс электрощеточных материалов — электрографитированный.

Перечисленные четыре класса электрощеточных материалов сохраняются в ассортименте продукции, изготавливаемой всеми электрощеточными предприятиями мира [Л. 1-5]. Вместе с компактной (литой) медью, используемой при изготовлении коллекторных пластин, они составляют основу всех скользящих контактов в современном электромашиностроении [Л. 1-6]. И это обстоятельство является не случайным, так как объясняется особенностями природы веществ, используемых для изготовления контактных материалов. На рис. 1-1 изображены кристаллические решетки и структурные схемы меди, графита кокса и сажи. Медь кристаллизуется в решетку гранецентрированной кубической системы, в узлах которой расположены атомы, содержащие по 29 электронов; 28 из них находятся на трех внутренних орбитах; на четвертой, внешней, находится только 1 электрон. Расположение атомов в кристалле столь плотно, что орбиты внешних электронов перекрываются. Это позволяет электронам свободно перемещаться по кристаллической решетке меди, не испытывая какого-либо существенного влияния со стороны отдельных находящихся в ее узлах

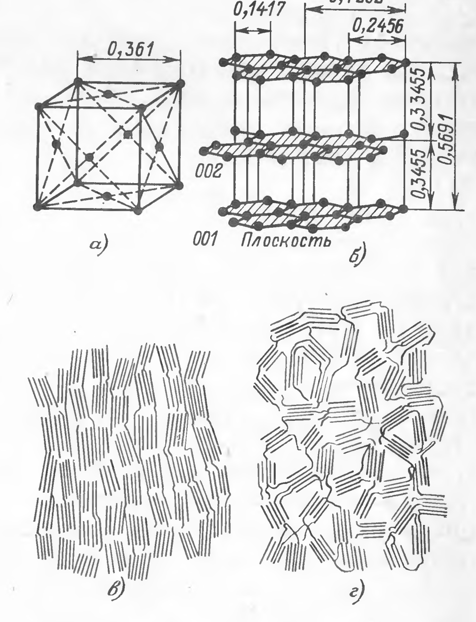


Рис. 1-1. Элементарные кристаллические решетки и структурные схемы веществ, используемых для изготовления контактных материалов.

а — меди; *б* — графита; *в* — кокса; *г* — сажи; размеры в нанометрах (нм).

атомов. Происходит обобществление свободных электронов, направленное движение которых и создает электрический ток.

Принципиально по-другому образован кристалл графита. Представляя собою особую аллотропную форму углерода, графит кристаллизуется в решетку гексагональной системы таким образом, что образующие его атомы размещаются в углах правильных шестиугольников. Эти шестиугольники располагаются в одной плоскости, образуя характерную сетку-слой. Параллельно одной такой сетке располагается другая, несколько сдвинутая по отношению к первой сетка. Третья сетка-слой является проекцией первой; четвертая — второй и т. д. Атом углерода содержит шесть электронов, два из которых обращаются на внутренней орбите, а четыре — по

внешней. При указанных на рис. 1-1,*б* расстояниях между атомами в слое и между слоями в кристалле, характер связей между различными атомами оказывается различным. В пределах плоской сетки, т. е. вдоль плоскостей, каждый из атомов имеет трех ближайших соседей. Расстояние между ними таково, что орбиты их внешних электронов соприкасаются, а находящиеся на них атомы с противоположными спинами объединяются. Образовавшиеся таким образом ковалентные связи между атомами обладают энергией порядка 3,5 эВ. Между слоями, там, где расстояние между атомами увеличено, природа сил взаимодействия изменяется. В этом случае между атомами устанавливаются связи, определяемые силами Ван-дер-Ваальса, энергия которых составляет всего только 0,19 эВ на один атом. Описанная особенность кристаллической решетки графита обусловливает характер его электропроводности. В плоскости слоя, где действуют ковалентные связи, электроны прочно закреплены за теми атомами, связь между которыми они осуществляют. Свободных электронов здесь нет. Следовательно, сопротивление в этой плоскости при $T=0$ К теоретически бесконечно велико и проводимость практически отсутствует. При нагревании атомы начинают колебаться и создаются условия, при которых некоторые из связывающих их электронов покидают свои места, т. е. происходит нарушение некоторых междуатомных связей. Освободившиеся при этом электроны ведут себя подобно свободным электронам металла, и кристалл графита из изолятора превращается в проводник.

Кристаллы и тела, электропроводность которых изменяется с температурой по только что описанной схеме, известны под названием полупроводников. Следовательно, графит является полупроводником и законы, управляющие этой группой материалов, распространяются также и на графит. Как и всякий полупроводник, графит с идеальной бездефектной кристаллической решеткой обладает собственной электронной и дырочной проводимостью. Однако получение собственных полупроводников является затруднительным по той причине, что их очень трудно освободить от примесей. Между тем включение примесей даже в столь малых концентрациях как 10^{-7}—10^{-8} полного числа атомов уже оказывает значительное влияние на полупроводниковые свойства. По указанной причине в технических приложениях приходит-

ся иметь дело не с собственными, а с примесными полупроводниками, свойства которых зависят от характера и количества содержащихся в них добавок. В случае, если примесью является вещество с валентностью большей, чем валентность углерода (донор), атом примеси займет узел решетки вместо основного атома, израсходовав при этом на установление ковалентных связей только 4 своих электрона*. Прочие электроны атома примеси, будучи связаны со своим ядром сравнительно слабыми силами притяжения, могут легко от него отделяться и принимать участие в образовании электронной проводимости (полупроводник *n*-типа).

Возможна и такая ситуация, когда валентность примеси будет меньшей, чем у углерода (акцептор). В этом случае примесный атом будет взаимодействовать с веществом основного материала таким образом, что в системе атомов углерода образуются «дырки» и вся проводимость станет дырочной (полупроводник *р*-типа) [Л. 1-7, 1-8]. Таким образом, используемые для образования скользящего контакта углеграфиты с физической точки зрения оказываются полупроводниками примесного типа, могущими содержать как доноры, так и акцепторы. Отнесение их к *n*- или *р*-типу определяется тем, какой сорт носителей заряда в данной ситуации преобладает. Большое влияние на характер проводимости углеграфитов оказывает температура их термической обработки T_0. При низкотемпературном нагреве (до 900 °С) проводимость осуществляется за счет перемещения «дырок», т. е. является *р*-проводимостью. С повышением T_0 от 900 до 1 200 °С происходит первое заметное повышение электропроводности за счет электронов проводимости и углеграфит приобретает *n*-проводимость. Дальнейшее повышение T_0 примерно 2 000 °С снова приводит к появлению *р*-проводимости и только после того, как температура термообработки превысит 2 500 °С, в углеграфите окончательно устанавливается *n*-проводимость [Л. 1-9—1-11].

Помимо графита и меди при изготовлении электрощеточных материалов используются еще кокс и сажа. В отличие от объемной упорядоченности кристаллических решеток первых двух названных веществ углеродистое вещество кокса и сажи обладает только плоской упорядо-

* Справедливо для веществ, состоящих из атомов, близких между собой по размерам.

ченностью. Это означает, что слагающие их шестичленные атомные ячейки образуют слои или сетки, расположенные в плоскости. Схемы образуемых при этом структур для сажи и кокса несколько различаются между собой (рис. 1-1,*в* и *г*), но для каждой из них характерно отсутствие трехмерной упорядоченности. В дальнейшем будет показано, как подобное обстоятельство связано с такой важной характеристикой рассматриваемого контакта, как коммутационная способность. Здесь отметим, что медь, графит, кокс и сажа составляют основу всех промышленных материалов, используемых при изготовлении элементов скользящего контакта в электромашиностроении. Применительно к коллекторным пластинам подобным материалом является электролитическая медь, в которую иногда вводят легирующие добавки кадмия, серебра, магния, хрома, циркония и теллура. Некоторые сведения о меди, используемой при изготовлении коллекторных пластин в электромашиностроительной промышленности ряда стран, приведены в табл. 1-1. Ассортимент материалов, используемых при изготовлении контактных колец, является более обширным. Наряду с медью и ее сплавами с цинком, свинцом и алюминием применяются также черные металлы и их сплавы. Последние используются главным образом в условиях, когда работающие кольца испытывают значительные механические напряжения. При всем этом интервалы изменения свойств литых контактных материалов являются весьма ограниченными. Между тем режимы эксплуатации скользящего контакта электрических машин требуют, чтобы свойства контактных материалов и характеристики совместной работы контактных элементов изменялись в широких пределах. Подобное требование удовлетворяется за счет выбора материалов, из которых изготавливаются электрощетки. Эти материалы представляют собой многокомпонентные композиции, состоящие из порошков графита, сажи, меди и кокса *. Варьируя соотношение компонент и используя различные схемы технологических процессов переработки, предприятия соответствующих отраслей промышленности в различных странах выпуска-

* Технологические процессы изготовления электрощеточных материалов, так же как и упоминаемые далее расчеты по определению статистических параметров распределения численных значений их технических характеристик, подробно описаны автором в [Л. 1-4 и 1-18].

Таблица 1-1

Характеристики меди, используемой для изготовления коллекторных пластин в машиностроении ряда стран*

Страна	Наименование материала и документа, регламентирующего его технические характеристики	Удельное электросопротивление, Ом·мм²/м	Модуль упругости, 10^7 Па (кгс/мм²)	Предел прочности при растяжении, 10^7 Па (кгс/мм²)	Твердость по Бринеллю, 10^7 Па (кгс/мм²)	Плотность, г/см³	Относительное удлинение, %
СССР	Медь марки М1 по ГОСТ 859-41	0,0179	11 200	27	75	8,9	6,0
СССР	Кадмиевая медь марки $К_д$-2 по ГОСТ 1467-58	—	12 600	50	95—115	8,9	1,6
Англия	Медь марок С101 и С102 по Стандарту BS1434-64	0,01737—0,01777	—	26,0—31,5	80—90**	—	—
Швеция	Медь марки 5011-24 по Стандарту SEN 260703-63	0,0178	12 000	—	90—110**	8,93	—
„	Медь марки 5030-24 по Стандарту SEN 260703-63	0,0200	12 000	—	95—115**	8,90	—
Япония	Медь марки CMB1 по Стандарту JIS 2801-59	—	—	26—32	78—108**	—	7—11
„	Медь марки CMB2 по Стандарту JIS 2801-59	—	—	28—34	100—110**	—	5—8
ФРГ	Медь марки E-Cu, F20 по DIN 40500-62	0,01754	11 000	20	40—65	—	35
ФРГ	Медь марки E-Cu, F25 по DIN 40500-62	0,01754	11 000	25	65—90	—	8,0
ФРГ	Медь марки E-Cu, F30 по DIN 40500-62	0,01786	11 000	30	85—105	—	5,0
ФРГ	Медь марки E-Cu, F37 по DIN 40500-62	0,01818	11 000	37	95—115	—	3,0

* Подробные сведения о технических характеристиках коллекторных материалов, так же как и о материалах контактных колец, можно найти в работе автора [Л. 1-6].

** Здесь указаны значения твердости по Виккерсу.

ют десятки марок электрощеточных материалов, классифицируемых в соответствии с показателями табл. 1-2. Каждая конкретная марка материала данного класса отличается определенным соотношением входящих в нее компонент и кривой распределения численных значений относящихся к ней технических характеристик. Упомянутая кривая с достаточной для практики точностью описывается уравнением кривой нормального распределения. Это уравнение имеет следующий вид:

$$y = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\sigma} e^{-(x-\overline{X})^2/2\sigma^2}; \qquad (1\text{-}1)$$

здесь параметр расположения распределения $\overline{X}$ представляет собой среднее наиболее вероятное (номинальное) значение характеристики, а параметр рассеяния σ — меру рассеяния отдельных частных значений характеристики x от ее среднего $\overline{X}$.

Сколь велики возможности изменения свойств контактных материалов за счет изменения их состава и технологии, можно установить, рассмотрев графики на рис. 1-2, где на оси абсцисс отложены компоненты состава. Средняя линия соответствует материалу, состоящему полностью из графита (100%). По мере перемещения от средней линии влево в составе материала происходит постепенное замещение графита медью; при перемещении вправо графит постепенно замещается сажей. На оси абсцисс произведена разметка ряда подклассов материалов, устанавливаемых в соответствии с табл. 1-2. Кривые изменения свойств электрощеточных материалов IV класса являются продолжением линий, описывающих соответствующие свойства материалов I класса. Это объясняет исторически наблюдавшуюся последовательность появления различных классов электрощеточных материалов. Сначала были созданы материалы I класса, затем материалы II, III и, наконец, IV класса. Последние и составили логическое завершение изменения свойств контактных материалов, необходимых для обеспечения работы электрических скользящих контактов.

Кратность изменения численных значений характеристик, представленных на рис. 1-2, является различной *.

* Описание метода построения графиков на рис. 1-2 с указанием значений различных характеристик ряда марок электрощеточных материалов произведено автором в работах [Л. 1-4, 1-6, 1-19].

Таблица 1-

Групповая классификация электрощеточных материалов

Номер класса	Класс	Группа (подкласс)	Исходные материалы и процесс изготовления
I	Металлографитный	А. С высоким содержанием меди (более 75 %) и с легирующими добавками	Порошки графита, меди, свинца и олова. Смешение без связующего, прессование, спекание при температуре ниже 1 000 °C
		Б. С повышенным содержанием меди (50—75 %) и с легирующими добавками	Порошки графита, меди, свинца и олова. Смешение, прессование, спекание при температуре ниже 1 000 °C
		В. С высоким содержанием меди (более 75 %)	Порошки графита и меди. Смешение без связующего, прессование, спекание при температуре ниже 1 000 °C
		Г. С повышенным содержанием меди (50—75 %)	То же
		Д. С пониженным содержанием меди (до 50 %)	Порошки графита и меди. Смешение с небольшим количеством связующего, прессование, спекание при температуре ниже 1 000 °C
		Е. С малым содержанием меди около 10 %	Графит с небольшой добавкой медного порошка (катализатора). Прессование, спекание при температуре ниже 1 000 °C
II	Угольнографитный	А. Средней твердости	Порошки графита и других угольных материалов (сажа, кокс). Смешение со связующим (пек, смола), прессование, спекание при температуре выше 1 000 °C
		Б. Повышенной твердости	Порошки угольных материалов (сажа, пек) с примесью графита. Смешение со связующим (смола, пек), прессование, спекание при температуре выше 1 000 °C
III	Графитный	А. Графитная (обычная)	Порошки графита. Смешение со связующим (смола, пек), прессование, спекание при температуре выше 1 000 °C

Номер класса	Класс	Группа (подкласс)	Исходные материалы и процесс изготовления
III	Графитный	Б. Натурально-графитная	Порошок графита. Большей частью прессуется без связующего и без спекания; иногда прибавляется немного связующего (смола, бакелит) и материал спекается при температуре 200—500 °C
		В. Высокоомная	Порошок графита. Смешение со связующим (обычно бакелит), прессование, спекание при температуре порядка 200 °C
		Г. Абразивная	Порошок графита с примесью абразивного вещества (иногда также и с примесью различных угольных материалов). Смешение со связующим (смола, бакелит), а в иных случаях без связующего (аналогично материалам III Б), прессование, спекание при различных температурах (от 200 до 1 000 °C и выше)
IV	Электрографитированный	А. Мягкая	Подобны графитным щеткам (IIIА), но подвергаются процессу электрографитации, т. е. термической обработке при 2 700—3 000 °C
		Б. Средней твердости	Подобны угольно-графитовым щеткам (IIА и IIБ), но подвергаются процессу электрографитации
		В. Твердая	Подобны твердым угольно-графитовым щеткам (IIБ), но подвергаются процессу электрографитации

Так, для материалов, описываемых основными (сплошными) линиями графиков, значения характеристик γ и E изменяются в 2—3 раза, а характеристики ρ — почти в 1 000 раз. Рассматриваемая кратность изменений мо-

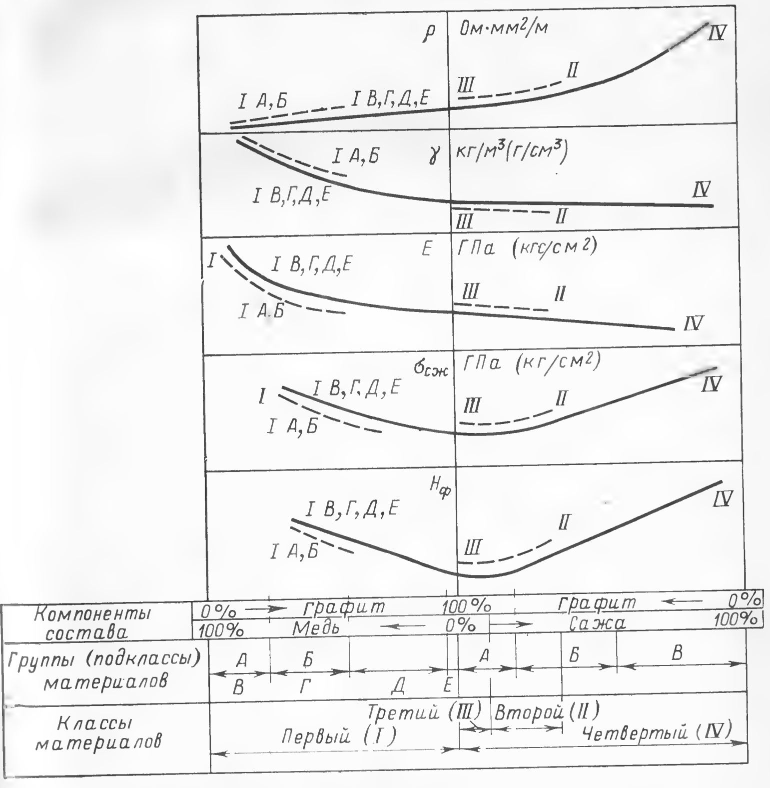


Рис. 1-2. Изменение некоторых свойств контактных порошковых материалов в зависимости от их состава.

ρ — удельное электрическое сопротивление; γ — плотность; E — модуль упругости первого рода; $\sigma_{сж}$ — предел прочности на сжатие; $H_ф$ — твердость по ГОСТ 9506-65.

жет быть еще более увеличена за счет введения в электрощеточные материалы пропитывающих веществ или искусственных смол.

Помимо свойств собственно контактных материалов необходимо учитывать еще и свойства контактной пленки (политуры), покрывающей поверхности скольжения коллекторов и контактных колец. Последняя в случае рабо-

ты электрографитированной электрощетки на медном коллекторе состоит из закиси меди Cu_2O (65,8%), углеродистого материала электрощетки C (22,1%) и некоторого количества (12,7%) примесей SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 и CaO. Закись меди располагается слоем $210 \cdot 10^{-10}$ м (ангстрем) непосредственно на металле коллектора. Над ним находится более толстый слой, равный примерно $330 \cdot 10^{-10}$ м (ангстрем) материала электрощетки. Примеси вносятся в политуру из материала электроугольных изделий и окружающей среды [Л. 1-12, 1-13]. В [Л. 1-14, 1-15] отмечалось, что в зависимости от условий образования и состояния окужающей среды толщина политуры может изменяться в пределах $50—1\,000 \cdot 10^{-10}$ м. В [Л. 1-15] отмечалось также, что под анодно-поляризованной электрощеткой толщина той части политуры, которая слагается из закиси меди, является несколько меньшей, чем под электрощеткой противоположной полярности.

Прилегающий к меди слой закиси Cu_2O является полупроводником, обладающим дырочной проводимостью, т. е. полупроводником *p*-типа. На границе соприкосновения полупроводника *p*-типа с медью коллектора, имеющей электронную проводимость, образуется запорный слой, оказывающий неодинаковое сопротивление току, протекающему в различных направлениях. При протекании тока из меди в слой закиси сопротивление оказывается значительно более высоким, чем при протекании тока в обратном направлении. Описываемая особенность запорного слоя определяет возможность использования его в выпрямляющих устройствах (купроксные выпрямители) [Л. 1-16, 1-17]. Эта особенность окажет свое влияние на рассматриваемые в дальнейшем полярные различия некоторых характеристик скользящего контакта.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ СКОЛЬЗЯЩЕМ КОНТАКТЕ

В процессе выполнения своей основной функции передачи тока между взаимоперемещающимися частями электрических машин элементы скользящего контакта находятся в весьма сложном взаимодействии. При этом между контактирующими элементами возникают силы

трения, происходит их взаимное изнашивание, выделяется тепло, протекают химические реакции, появляются вибрации и т. п. Каждое из перечисленных явлений имеет свою физическую природу и оказывает влияние на работу всего контакта в целом. Рассмотрим явление передачи тока.

Известно, что процесс прохождения тока в любой электрической цепи, в том числе и в цепи, содержащей скользящий контакт, обусловлен перемещением носителей тока. Таковыми могут являться электроны, положительные и отрицательные ионы и «дырки». Для того чтобы решить вопрос о том, какие из перечисленных носителей проявляют себя в рассматриваемом виде скользящего контакта, необходимо ознакомиться с его структурой. Рассматривая расположение электрощеток и коллектора после того как контакт проработал в течение длительного периода времени, можно обнаружить, что область контакта состоит из трех зон. В одной из них возможность перемещения носителей тока обусловлена непосредственным соприкосновением контактирующих элементов. В другой зоне подобное соприкосновение нарушается появлением клиновидных зазоров между контактирующими элементами. Зазоры наполнены пылевидными продуктами их износа, создающими электрическую цепь, подобную той, которая образуется в микрофоне угольным порошком. В контакте существует еще и третья зона, в которой расстояние между контактирующими элементами является более значительным, чем во второй зоне, и зазоры в которой хотя и содержат продукты износа, но их количество недостаточно для того, чтобы замкнуть электрическую цепь. По указанной причине прохождение тока в третьей зоне оказывается возможным только благодаря проводимости воздушного промежутка. Из изложенного следует, что весь проходящий через электрощетку ток передается противостоящему элементу тремя путями: а) через точки непосредственного механического контакта; б) через порошкообразные продукты износа; в) через воздушный промежуток. Однако столь четкое разделение области контакта на три зоны сохраняется далеко не во все периоды его работы. В зависимости от состояния вращающейся поверхности скольжения, частоты ее вращения, частоты пусков и реверсов, нагрузки и многих других факторов размеры каждой из зон будут изменяться, а некоторые из них мо-

гут даже исчезать. Вот почему при определении путей прохождения тока в скользящем контакте всегда приходится предусматривать возможность одновременного существования всех трех зон, не оговаривая, какая из них в данный момент является главенствующей. Кроме того, не следует также упускать из виду и то обстоятельство, что в основе приведенного деления области контакта на три зоны лежал фактор конструктивного порядка (например, тангенциальный размер щеток и его отношение к радиальному). Именно этот фактор определял возможные пути прохождения тока в зависимости от складывающейся в каждой из зон ситуации (наличие или отсутствие контакта). Если отвлечься от возможных изменений конструктивного оформления путей прохождения носителей тока и обратиться к физике, то окажется, что здесь могут иметь место две следующие возможности: а) носители тока перемещаются внутри кристаллической решетки контактирующих твердых тел, не выходя в окружающее их пространство; б) носители тока покидают кристаллическую решетку одного из контактирующих тел, выходят в окружающее пространство и, пройдя определенный участок пути в этом пространстве, снова попадают в кристаллическую решетку твердого тела.

Рассмотрим условия прохождения носителей тока внутри кристаллической решетки контактирующих твердых тел. Контакт в данном случае осуществляется через отдельные точки соприкосновения, оптимальное число которых в каждый данный момент времени равно трем (таково оптимальное количество точек, обеспечивающее устойчивое равновесие электрощетки на коллекторе). С течением времени одни точки контакта непрерывно заменяются другими, но так, что непосредственный контакт* между электрощеткой и поверхностью скольжения коллектора при этом не нарушается. Таким образом, с физической точки зрения, имеющий при этом место электрический контакт может быть представлен эквивалентной схемой точечно-контактного полупроводникового тетрода с p-n-проводимостью, через который носители тока перемещаются на участке «электрощетка — политура». Далее им предстоит еще пройти по участку

* Для создания непосредственного контакта необходимо, чтобы расстояние между контактирующими элементами было того же порядка, что и расстояние между атомами в кристаллической решетке, т. е. 10^{-8} см.

«политура — толща металла коллектора». При неповрежденной в механическом и электрическом отношениях политуре эквивалентная схема этого участка пути может быть представлена в виде плоскостного двухэлектродного перехода (диода), в котором контактирующими элементами является полупроводник p-типа (пленка и металл). В случае отсутствия политуры, когда электрощетка соприкасается непосредственно с поверхностью скольжения, описанный несколько выше точечно-контактный полупроводниковый p-n-тетрод превращается в переход типа металл — полупроводник с электронной проводимостью.

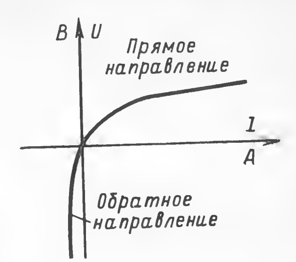


Рис. 2-1. Вольт-амперная характеристика p-n-перехода.

Закономерности прохождения носителей тока в переходах описываемых типов изучаются с помощью зонной теории. В отличие от электронной теории, которая рассматривает электрический ток как направленное движение свободных электронов кристаллической решетки твердого тела, зонная теория объясняет возникновение тока переходом его носителей на более высокие энергетические уровни [Л. 1-7, 1-16, 1-17, 2-1]. Для изучения закономерностей прохождения носителей тока в скользящем контакте, рассматриваемом как описанные выше переходы, можно воспользоваться сопряженными зонными диаграммами. С помощью подобных диаграмм удается установить, что направление и величина тока через переход зависят от знака и величины приложенного к нему напряжения. Если это напряжение прикладывается так, что ток через переход усиливается, то его называют прямым, при уменьшении тока — обратным. Аналогичные названия присваиваются и соответствующим токам. Связь между током и напряжением в описываемой ситуации изображается вольт-амперной характеристикой, показанной на рис. 2-1, из рассмотрения которой следует, что при данном значении внешнего напряжения прямому току оказывается значительно меньшее сопротивление, чем обратному.

Переходы, обладающие характеристикой, показанной на рис. 2-1, называются выпрямляющими. Ветви этой характеристики изменяются по экспоненциальному зако-

ну. Для них характерно наступление такого состояния, при котором изменение одних величин не вызывает изменения других. В подобном случае принято говорить о наступлении режима насыщения. Здесь следует заметить, что описанный механизм прохождения тока через политуру и переход его в металл изменяется, когда напряженность электрического поля внутри пленки достигает величины порядка 10^8—10^7 В/см. В этом случае происходит электрический пробой пленки. Некоторые авторы склонны считать, что подобный пробой является основным способом прохождения тока на этом участке пути его следования [Л. 1-9].

Рассмотрим далее условия прохождения тока через воздушный зазор. Для того чтобы подобный процесс мог совершиться, носителям тока необходимо покинуть кристаллическую решетку твердого тела и выйти в окружающее его пространство. Носителями тока на этом участке пути его следования являются электроны. Выход из материала контактирующих элементов, которые в данном случае следует рассматривать как электроды, называется эмиссией. В соответствии со знаком заряда электроны эмиттируют с отрицательно поляризованного электрода — катода. Эмиссия электронов из катода определяется особенностями силового поля, действующего на границе твердое тело — среда. Дело в том, что, когда электроны проводимости выходят из твердого тела, на них начинают действовать силы двух родов: силы отталкивания от остающихся в твердом теле связанных электронов и силы притяжения со стороны положительно заряженных узлов кристаллической решетки. Поскольку вторые больше первых, на границе раздела создается силовое поле, стремящееся удержать электроны в твердом теле.

Связь между током и напряжением в рассматриваемых условиях является чрезвычайно сложной. До тех пор, пока количество образующихся в воздушном зазоре электронов и ионов будет превышать количество частиц, попадающих на электроды, ток в цепи возрастает с увеличением напряжения так, как это показано на участке *OA* рис. 2-2. По мере повышения приложенного напряжения все образующиеся заряженные частицы переносятся на электроды и рост тока прекращается (участок *AB*). При дальнейшем возрастании приложенного напряжения в зазоре происходит ионизация атомов воздуха

электронами вследствие столкновений. В результате ток сначала медленно, а затем все более интенсивно растет. Описываемый разряд называют тихим или таунсендовским. Он является несамостоятельным, поскольку прекращается одновременно с прекращением действия источника ионизации. Если напряжение на электродах, образующих зазор, превысит значение потенциала пробоя U_{bd}, то разряд уже может существовать самостоятельно, без внешнего источника ионизации. Область

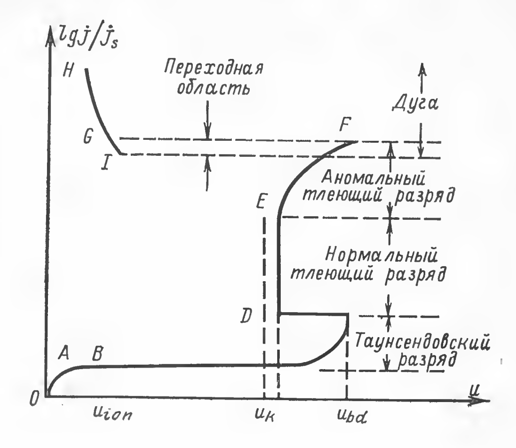


Рис. 2-2. Вольт-амперная характеристика газового разряда.

j — плотность анодного тока; j_s — плотность тока насыщения; $u_к$ — катодное падение; u_{bd} — напряжение пробоя.

существования такого нормального тлеющего разряда соответствует участку *DE*. При таком разряде в прикатодной области появляется спокойное, не особенно яркое свечение, а величина плотности тока в ней сохраняется постоянной. По мере увеличения общего тока, проходящего через зозор, светящаяся область на катоде расширяется. Если при этом осуществить дальнейшее повышение приложенного напряжения, плотность тока в катодном пятне начнет возрастать, но так, что увеличение общего тока через зазор будет происходить медленнее, чем рост напряжения. Соответствующая описываемому состоянию область *EF* называется областью аномального тлеющего разряда. По достижении точки *F* катодное свечение снова концентрируется на небольшом участке катода (катодное пятно) и разряд превращается в искровой (переходная область на участке *FG*). Появление этой формы разряда свидетельствует о том, что прогрессив-

ное увеличение проводимости среды закончилось нарушением ее электрической прочности. В результате скачкообразно снижается напряжение на электродах (точка *G*) и происходит резкий бросок тока. Дальнейшие процессы в системе определяются мощностью питающего источника. Если его мощность невелика, описанный цикл разрядов будет ритмично повторяться и в цепи будет происходить импульсная передача энергии. При достаточной мощности питающего источника скорость ритма значительно возрастает, отдельные импульсы сливаются в один непрерывный и бомбардировка катода положительными ионами становится столь интенсивной, что он раскаляется и начинает сам эмиттировать электроны. В результате разряд превращается в дуговой (область *I — G — H*), характеризующийся весьма низкой величиной катодного падения напряжения (10—20 В).

Все изложенное о механизме прохождения носителей тока через воздушный зазор базировалось на классических представлениях теории газового разряда. В самое последнее время появились исследования, ставящие себе целью учесть влияние на процесс искрообразования ряда параметров коллекторных электрических машин, на которых используется скользящий контакт. Так, например, в [Л. 2-2] рассмотрены явления коммутационного искрения с учетом плотности тока в сбегающем и набегающем краях электрощетки, удельного давления на нее, индуктивного, емкостного и омического сопротивлений обмоток якоря и некоторых других факторов.

Помимо описанных явлений, связанных с прохождением тока через скользящий контакт, большое значение для его нормальной работы имеют происходящие в нем процессы химического взаимодействия, трения и износа. Взаимодействующими компонентами при химических реакциях являются материал коллектора, материал электрощеток и вещества, входящие в состав окружающей среды. Факторами, направляющими и интенсифицирующими химические реакции, являются температура и электрический ток, протекающий через контакт. Состав окружающей среды, в случае если контакт работает в атмосфере обычного воздуха, приведен в табл. 2-1. Кроме перечисленных элементов в воздухе находится еще йод, перекись водорода, частицы пыли и водяной пар. Количество последнего в зависимости от температуры и давления колеблется в весьма широких

Таблица 2-1

Состав абсолютно сухого воздуха у поверхности земли

Составные части воздуха	Содержание, %	
	объема	массы
Азот	78,08	75,60
Кислород	20,95	23,10
Аргон	0,9325	1,286
Углекислый газ	0,030	0,046
Гелий	0,0005	0,00007
Неон	0,0018	0,0012
Криптон	0,000108	0,0003
Ксенон	0,000008	0,00004
Водород	0,00005	—
Аммиак	$\sim 2 \cdot 10^{-6}$	—
Озон	$\sim 1 \cdot 10^{-6}$	—
Радиоактивные эманации	$\sim 6 \cdot 10^{-18}$	—

Примечание. Состав воздуха в пределах тропосферы, т. е. до высот порядка 11—12 км, остается практически постоянным.

пределах (табл. 2-2). Сведения табл. 2-1 и 2-2 характеризовали состояние атмосферы у поверхности Земли. В связи с развитием реактивной авиации и освоением косми-

Таблица 2-2

Свойства воздуха при атмосферном давлении

Температура воздуха, °С	Масса 1 м³ сухого воздуха, кг	Содержание водяного пара, г, при полном насыщении	
		в 1 м³ воздуха	в 1 кг сухого воздуха
—20	1,396	1,1	0,80
—15	1,368	1,6	1,20
—10	1,342	2,3	1,70
—5	1,317	3,4	2,60
0	1,293	4,9	3,80
5	1,270	6,8	5,40
10	1,248	9,4	7,64
15	1,226	12,8	10,62
20	1,205	17,2	14,61
25	1,185	22,9	19,95
30	1,165	30,1	27,03
35	1,146	39,3	36,37
40	1,128	50,8	48,64
45	1,110	65,0	64,80
50	1,093	82,3	86,11
55	1,076	113,6	114,43
60	1,060	129,3	152,45

ческого пространства деталям электрического скользящего контакта приходится работать в так называемых высотных условиях, где термодинамические параметры и физические характеристики атмосферы существенно изменяются (ГОСТ 4401-61). Соответственно изменяется содержание в атмосфере водяных паров и вместе с этим изменяются условия работы контакта. В случае использования контакта в нормальной, содержащей водяные пары атмосфере, влага под влиянием тока электролитически разлагается. Образующиеся при этом катионы H_2 и анионы O под действием электрического поля перемещаются соответственно к катоду и аноду. Последнее означает, что в зоне контакта под анодно-поляризованной электрощеткой на ее рабочей поверхности отлагается кислород, а на медной поверхности коллектора — водород. В зоне контакта катодно-поляризованной электрощетки картина изменяется. Здесь к ее контактной поверхности поступают катионы водорода, а к коллектору — отрицательно заряженные атомы кислорода. Описанные явления определяют принципиальные различия процессов, происходящих в рабочей зоне контактирующих элементов различной полярности. Очевидно, что участок поверхности коллектора, выходящий из-под электрощетки-катода, подвергается интенсивному окислению (темнеет). Попав под электрощетку-анод этот участок коллектора химически восстанавливается (светлеет).

Из двух перечисленных процессов преобладающим является окислительный, поскольку он происходит не только в периоды пребывания участка коллектора под катодно-поляризованной электрощеткой, но и тогда, когда этот участок перемещается между двумя последовательно установленными над ним электрощетками. Кроме того, разогретая поверхность работающего коллектора поглощает также кислород из атмосферы. Кислород диффундирует сквозь слои Cu_2O и производит дальнейшее окисление меди.

Процесс окисления меди находится в динамическом равновесии с процессом истирания наружной части слоя Cu_2O, в результате чего поверхность скольжения коллектора покрывается окисной пленкой. Эта пленка является только одной из компонент политуры. Другой ее компонентой являются частицы, поступающие в зону контакта извне. Происхождение поступающих частиц различно. Одна их часть является продуктами механического износа контактирующих элементов; другая часть — продуктами их электроэрозии; третья привносится из окружающей среды. Сочетание указанных продуктов с окисной пленкой образует на рабочей поверхности коллектора политуру, цвет и состояние которой определяются большим числом различных обстоятельств. В числе последних находятся: род материалов, использованных для изготовления контактирующих элементов, электрические и механические режимы их эксплуатации, полярность, состав и влажность окружающей среды, температура в зоне контакта и многое другое. В зависимости от сочетания перечисленных обстоятельств поверхность скольжения приобретает различное состояние и разнообразную окраску. Особенно рельефно перечисленные взаимодействия наблюдаются при работе на контактных кольцах, когда электрощетки различной полярности расположены на отдельных следах. Так, например, если электрощетки из «черных» материалов работают в нормальной атмосфере на медных контактных кольцах, то кольцо, находящееся под анодно-поляризованной электрощеткой, остается гладким и покрывается частицами электрощеточного материала. Кольцо, расположенное под электрощеткой противоположной полярности, таких частиц на себе не имеет. Его рабочая поверхность становится матовой и шероховатой. Все это происходит потому, что под электрощеткой-анодом поверхность кольца химически восстанавливается и на нее переносятся частицы электроугольного материала. Под электрощеткой-катодом поверхность кольца окисляется и отделяющиеся от него частицы металла, внедряясь в контактную поверхность электрощетки или оставаясь в контактном зазоре, играют роль абразива. Если вместо электрощеток «черных» материалов установить «цветные», то в зоне контакта анодно-поляризованной электрощетки также появятся металлические частицы. В последнем случае создадутся условия для образования шероховатостей кольца и под электрощеткой этой полярности.

Только что описанные процессы образования политуры справедливы для случая нормальной работы скользящего контакта в обычной атмосфере. При нарушении указанного условия описанные процессы образования политуры изменяются и могут пойти по направлению, которое существенно изменит режим работы контакта. Так, например, если прохождение носителей тока через кон-

такт будет сопровождаться интенсивными искрообразованием, то испарение влаги прекратит ее электролиз. В результате состояния политуры изменится и вместе с этим изменятся электрические и механические параметры скользящего контакта. Аналогичные явления возникают при появлении в окружающей атмосфере некоторых газообразных соединений. Если, например, в ней появится сероводород, то в составе политуры окажется сернистая медь. Благодаря большей толщине и более прочной связи с материалом медного коллектора такая политура совершенно нарушает работу контакта, хотя электропроводность сернистой меди более высока, чем у Cu_2O. В [Л. 2-3] описан случай, когда в прядильном цехе одной из фабрик искусственного шелка при выделении большого количества влажного сероводорода электрические машины с медными коллекторами работать не могли. Выход был найден в применении коллекторов из железа, которое по отношению к сероводороду является вполне инертным. Появление в окружающей атмосфере хлора приводит к разрушению политуры. Соединяясь с влагой, хлор образует соляную кислоту, которая счищает как слои Cu_2O, так и слои отложившегося над ней материала электрощеток. При этом на контактной поверхности катодно-поляризованной электрощетки отлагаются частицы меди, а на коллекторе — значительное количество грязи. Аналогичным образом проявляет себя и аммиак.

Приведенные примеры иллюстрировали влияние на процесс образования политуры только некоторых факторов. Другие упомянутые ранее факторы, влияющие на рассматриваемый процесс, также оказывают влияние как на конечное состояние, так и на все другие явления, протекающие в скользящем контакте.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ПЕРЕХОДНОЕ ПАДЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ СКОЛЬЗЯЩЕМ КОНТАКТЕ

Величина переходного падения напряжения в скользящем электрическом контакте самым непосредственным образом связана с происходящими в нем электрическими явлениями. Экспериментальное определение названной характеристики производится с помощью установок,

схема включения которых показана на рис. 3-1. Здесь *1* представляет собою короткозамкнутый коллектор, приводимый во вращение электродвигателем с регулируемым числом оборотов; *2* и *3* — электрощетки различной полярности, армированные токоведущими проводами; *4* и *5* — регулировочные реостаты; *6* — источник тока низкого напряжения; *7* — амперметр; *8* — вольтметр. Изменяя ток

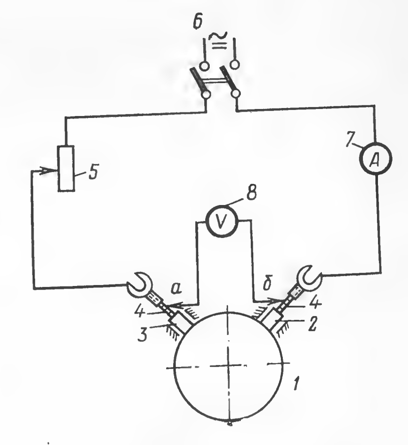


Рис. 3-1. Принципиальная схема определения переходного падения напряжения в электрическом скользящем контакте.

I в цепи, нажатие на электрощетки *p*, частоту вращения короткозамкнутого коллектора *n* и материал, из которого изготовлен этот коллектор и электрощетки, исследуем влияние перечисленных факторов на величину переходного падения напряжения $2\Delta U$. Диапазон исследований еще более расширится, если установку поместить в герметическую камеру. В последнем случае можно выявить влияние на рассматриваемую характеристику степени разрежения атмосферы, изменения ее состава, различных газов и т. п.

В измеряемую величину входят падения напряжения на всех участках цепи, расположенных между точками *а* и *б* (рис. 3-1). Измеряемая величина переходного падения напряжения слагается из следующих компонент:

Δu_1 — на участке длины токоведущего провода катодно-поляризованной электрощетки между точкой *а* и местом заделки этого провода в тело электрощетки;

Δu_2 — в месте заделки токоведущего провода в тело катодно-поляризованной электрощетки;

Δu_3 — в теле катодно-поляризованной электрощетки;

Δu_4 — в скользящем контакте под катодно-поляризо-

ванной электрощеткой, которое образуется в результате прохождения тока по двум параллельным цепям:

Δu_{41}—в контакте „электрощетка—газовая среда“;
Δu_{42}—в слое газовой среды;
Δu_{43}—в контакте „газовая среда—верхний слой политуры“;
Δu_{44}—в контакте „электрощетка—верхний слой политуры“;

Δu_5 — в верхнем слое политуры под катодно-поляризованной электрощеткой;

Δu_6 — в контакте «верхний слой политуры — нижний слой политуры Cu_2O» под катодно-поляризованной электрощеткой;

Δu_7 — в нижнем слое политуры Cu_2O под катодно-поляризованной электрощеткой;

Δu_8 — в контакте «нижний слой политуры Cu_2O — материал коллектора» под катодно-поляризованной электрощеткой;

Δu_9 — в материале коллектора;

Δu_{10} — в контакте «материал коллектор — нижний слой политуры Cu_2O» под анодно-поляризованной электрощеткой;

Δu_{11} — в нижнем слое политуры Cu_2O под анодно-поляризованной электрощеткой;

Δu_{12} — в контакте «нижний слой политуры Cu_2O — верхний слой политуры» под анодно-поляризованной электрощеткой;

Δu_{13} — в верхнем слое политуры под анодно-поляризованной электрощеткой;

Δu_{14} — в скользящем контакте под анодно-поляризованной электрощеткой, которое, подобно тому как это имело место при определении величины Δu_4, образуется в результате прохождения тока по двум параллельным цепям:

Δu_{141}—в контакте „верхний слой политуры—газовая среда“;
Δu_{142}—в слое газовой среды;
Δu_{143}—в контакте „газовая среда—электрощетка“;
Δu_{144}—в контакте „верхний слой политуры—электрощетка“;

Δu_{15} — в теле анодно-поляризованной электрощетки;

Δu_{16} — в месте заделки токоведущего провода в тело анодно-поляризованной электрощетки;

Δu_{17} — на участке длины токоведущего провода анодно-поляризованной электрощетки от места заделки до точки *б*.

При рассмотрении перечисленных слагаемых нетрудно заметить, что среди них имеются такие, значения которых не зависят от направления тока в цепи и которые для данной конструкции электрощеток можно принимать попарно равными:

$$\Delta u_1=\Delta u_{17};\ \Delta u_2=\Delta u_{16};\ \Delta u_3=\Delta u_{15}.$$

Последние шесть величин, так же как и Δu_9, для данной конструкции и материала электрощеток и коллектора

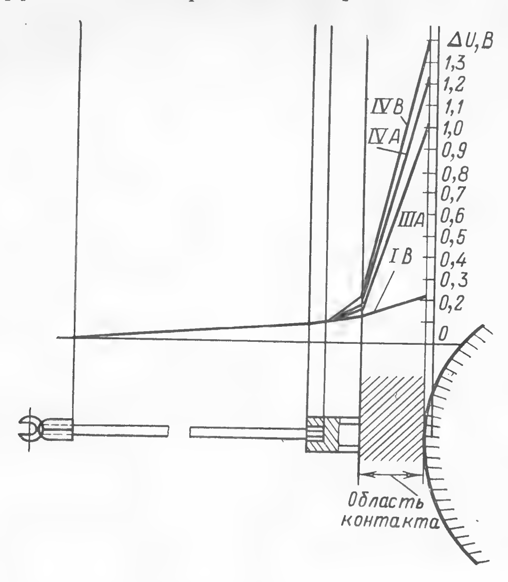


Рис. 3-2. Распределение измеряемой величины переходного падения напряжения по участкам электрической цепи для электрощеточных материалов различных классов и групп в соответствии с классификацией табл. 1-2.

при выбранном значении тока в цепи, могут быть определены простым расчетом. Значения всех прочих перечисленных составляющих, строго говоря, должны определяться как разность между величиной $2\Delta u$, показываемой вольтметром при проведении эксперимента, (рис. 3-2), и рассчитываемыми величинами

$$\Delta u_4+\Delta u_5+\Delta u_6+\Delta u_7+\Delta u_8+\Delta u_9+\Delta u_{10}+\Delta u_{11}+\Delta u_{12}+\Delta u_{13}+\Delta u_{14}=2\Delta U-(\Delta u_1+\Delta u_2+\Delta u_3+\Delta u_{15}+\Delta u_{16}+\Delta u_{17}). \quad (3\text{-}1)$$

Для ряда материалов члены, стоящие в скобках правой части равенства (3-1), составляют малую часть измеряемого значения $2\Delta U$, и в этих случаях с достаточной для практики точностью можно принимать *

$$2\Delta U \approx \Delta U_- + \Delta U_+, \tag{3-2}$$

где

$$\Delta U_- = \Delta u_4 + \Delta u_5 + \Delta u_6 + \Delta u_7 + \Delta u_8; \tag{3-3}$$

$$\Delta U_+ = \Delta u_{10} + \Delta u_{11} + \Delta u_{12} + \Delta u_{13} + \Delta u_{14}. \tag{3-4}$$

Для того чтобы раздельно определять величины ΔU_- и ΔU_+, схему, изображенную на рис. 3-1, несколько видоизменяют. Оставляя один конец вольтметра в точке *а* (или *б*), другой его конец подключают к вспомогательной электрощетке с малым переходным падением напряжения, скользящей по коллектору в непосредственной близости от основной отрицательной (или положительной) электрощетки.

На основании (3-1)—(3-4) можно также заключить, что при проведении экспериментов по описываемым схемам при постоянном значении тока в цепи все наблюдаемые изменения значений ΔU_-; ΔU_+ и $2\Delta U$ определяются процессами, происходящими в скользящем контакте. Если опыты производятся при изменяющемся токе в цепи, то в изменениях величин, измеряемых вольтметром, некоторую роль начинают играть изменения значений членов, стоящих в скобках правой части (3-1). Однако в соответствии с (3-2) принято считать, что и в этом случае все наблюдаемые изменения обусловлены только теми явлениями, которые происходят в зоне скользящего контакта.

При изучении переходного падения напряжения эксперименты ставятся обычно по одной из двух схем. Первая из них состоит в том, что электрощетку нагружают током, величина которого определяется по формуле

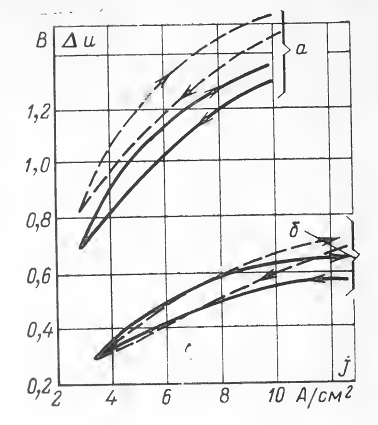
$$I_н = Fj_н, \tag{3-5}$$

где F — площадь поперечного сечения контактной поверхности электрощетки, см²; $j_н$ — номинальная плотность тока для материала испытуемой марки электрощеток, выбираемая по ГОСТ или фирменным каталогам.

Измеренному значению переходного падения напряжения при указанном значении тока $I_н$ присваивается название «номинальное» $2\Delta U_н$.

* Справедливо для материалов всех групп II, III и IV классов и групп Б, Г и Д I класса

Вторая схема постановки эксперимента заключается в том, что ток в цепи постепенно изменяется от нуля до некоторого значения и в процессе этого изменения при фиксации отдельных значений I измеряются соответствующие им значения $2\Delta U$ (время выдержки на каждой ступени тока равно 3—5 мин). По полученным описанным образом парным значениям I и $2\Delta U$ строится кривая $2\Delta U = f(I)$, которую называют статической вольт-амперной или просто вольт-амперной характеристикой скользящего контакта *. Если опыт видоизменить, переключив установку на питание переменным током и включив вместо амперметра и вольтметра выводы осциллографа, можно получить динамическую характеристику скользящего контакта [Л. 3-2].



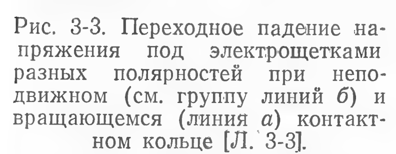


Рис. 3-3. Переходное падение напряжения под электрощетками разных полярностей при неподвижном (см. группу линий *б*) и вращающемся (линия *а*) контактном кольце [Л. 3-3].

—— — анодно-поляризованная электрощетка марки EGA; — — — — катодно-поляризованная электрощетка той же марки.

Первое представление о влиянии на статическую вольт-амперную характеристику контакта факта превращения его из неподвижного в скользящий можно получить из рис. 3-3. Соответствующие опыты производились на экспериментальной установке для контактной пары «медный короткозамкнутый коллектор — электрографитированная электрощетка», причем в одном случае коллектор был неподвижным (точнее, перемещался с «ползучей скоростью»), а в другом — вращался. В обоих случаях графики строились при возрастании и снижении тока в цепи (см. направление стрелок). Графики отра-

* Подробное описание метода определения статической вольт-амперной характеристики переходного падения напряжения и характеристик коэффициента трения и износа дано в [Л. 3-1].

жают наиболее вероятное развитие процесса и свидетельствуют о том, что в случае неподвижного контакта падение напряжения под электрощетками обеих полярностей при плотности тока $j \leqslant 8 А/см^2$ является практически одинаковым и только при $j > 8 А/см^2$ начинает проявляться неравенство $\Delta U_- > \Delta U_+$. При вращающемся коллекторе неравенство $\Delta U_- > \Delta U_+$ имеет место во всем диапазоне изменения плотности тока в скользящем контакте *, при этом существенно возрастают абсолютные значения величин ΔU_- и ΔU_+.

Поскольку физическое состояние электрощеток, их контактных поверхностей и поверхности скольжения короткозамкнутого коллектора при сообщении последнему вращения не изменилось, остается заключить, что факт значительного возрастания значений ΔU обусловлен соответствующим увеличением членов Δu_4 и Δu_{14}. Последнее произошло благодаря изменению состояния собственно контактной зоны, в которой вместо составляющих Δu_{44} и Δu_{144} начали действовать составляющие Δu_{41}, Δu_{42}, Δu_{43}, Δu_{141}, Δu_{142} и Δu_{143}.

Переходное падение напряжения, резко возрастающее при превращении контакта из неподвижного в скользящий, в дальнейшем по мере возрастания скорости перемещения контактирующих элементов остается практически постоянным. Последнее положение является справедливым для случая, когда работа скользящего контакта протекает нормально и не сопровождается вибрациями. При несоблюдении указанных условий величина $2\Delta U$ может стать зависимой от относительной скорости перемещения контактирующих элементов [Л. 3-4].

На рис. 3-3 помимо влияния скорости на переходное падение напряжения рассматривается вопрос о соотношениях значений ΔU под электрощетками разной полярности. Показанное на этом рисунке неравенство $\Delta U_- > \Delta U_+$ подтверждено рядом исследователей, но объясняется ими по-разному. Так, Р. Мейер объясняет отмечаемое неравенство тем, что анодно-поляризованная электрощетка выделяет в зону скользящего контакта значительное количество тонкодисперсных частиц, которые частично снимаются электрощеткой противоположной полярности. В результате последняя контактирует с коллектором через значительно меньшее количество частичек, что и обусловливает повышение переходного падения напряжения под ней [Л. 3-3]. Р. Хольм [Л. 1-9], ссылаясь на [Л. 3-6] и некоторые другие источники, объясняет отмечаемое неравенство особенностями взаимодействия приложенного к контакту электрического поля и положительно заряженных ионов материала коллектора (т. е. меди), вырывающихся с его поверхности. Эти особенности состоят в том, что под катодно-поляризованной электрощеткой направление поля способствует перемещению положительных ионов меди из тела коллектора к политуре, где они принимают участие в образовании слоя Cu_2O, являющегося полупроводником. Под анодно-поляризованной электрощеткой направление поля препятствует подобному перемещению катионов меди. Здесь в зону контакта по направлению к политуре перемещаются положительно заряженные носители тока, вырывающиеся из материала электрощетки. Если последняя изготовлена из графита или электрографита (а именно такой случай изображен на рис. 3-3), ионы этих материалов не образуют на политуре изолирующих соединений и ΔU_+ приобретает пониженное по сравнению с ΔU_- значение.

Недостаток объяснения Р. Мейера состоит в том, что оно совершенно игнорирует роль политуры. Р. Хольм в своем объяснении, хотя и отводит политуре некоторую роль, связывает рассматриваемое неравенство с явлением переноса ионов меди. Между тем электропроводность меди является электронной и причину возникновения неравенства переходного падения напряжения под электрощетками разной полярности следует искать в условиях перемещения носителей тока через переходы. Эти условия для переходов, расположенных под анодно-поляризованной электрощеткой, таковы, что содействуют понижению высоты потенциального барьера на границе перехода. Для переходов, находящихся под электрощеткой противоположной полярности, соответствующие условия увеличивают высоту потенциальных барьеров на

* Рассматриваемое здесь неравенство величин ΔU под различным образом поляризованными электрощетками, обусловленное чисто электрическими причинами, следует отличать от неравенства, обусловленного механическим состоянием поверхностей скольжения контактных колец различной полярности. Как отмечали еще В. Гейндрих [Л. 3-5] и И. Нейкирхен [Л. 2-3], на кольце, работающем с положительной электрощеткой, поверхность скольжения отполирована и значение ΔU_+ больше, чем у кольца, работающего с катодно-поляризованной электрощеткой и имеющего шероховатую поверхность скольжения.

границе перехода. Соответственно изменяется величина работы выхода электронов из меди и слоя ее закиси. В результате представляется возможным заключить, что значение Δu_8 должно превышать величину Δu_{10}. Последнее и предопределяет неравенство $\Delta U_- > \Delta U_+$. При этом не следует представлять себе дело так, что последнее соотношение является абсолютным. В случае, если материал электрощеток содержит в своем составе медь, а также и под влиянием повышенных температур, приведенное неравенство из-за отрицательного температурного коэффициента сопротивления окиси меди может измениться на обратное, т. е. превратиться в $\Delta U_- < \Delta U_+$ [Л. 3-7]. К такому же результату приводит использование в качестве материала для контактного кольца латуни. Окись свинца является полупроводником *n*-типа, и условия перехода носителей тока под катодно-поляризованной электрощеткой оказываются изменившимися, что создает предпосылки для существенного облегчения перехода под электрощеткой-катодом.

Влияние политуры на соотношение величин ΔU_- и ΔU_+, равно как весь ход кривой $2\Delta U = f(j)$, убедительно иллюстрируется рис. 3-4,*а*; линия *1* получена при испытании электрощеток на медном коллекторе, линии *2—5* на коллекторах, изготовленных соответственно из угля, серебра, золота и электрографита. Из перечисленных здесь материалов только медь способна образовывать слой политуры — полупроводника, которому свойственно, как это было показано на рис. 2-1, сообщать вольт-амперной характеристике способность сохранять постоянными значения напряжения при возрастании значений *j*. Прочие из перечисленных материалов, не обладая способностью окисляться, политуры не образуют. Отсутствие последней и предопределяет прямолинейный характер зависимости $2\Delta U = f(j)$. Линия *5* рис. 3-4,*а* интересна тем, что характеризует величины ΔU, измеренные под электрощетками различной полярности. Оказывается, что при отсутствии политуры $\Delta U_- = \Delta U_+$ [Л. 3-8]. Последнее соотношение еще раз подтверждает соображение о влиянии политуры на образование неравенства $\Delta U_- > \Delta U_+$.

Графики на рис. 3-4,*а* получены при испытании электрографитированных электрощеток на вращающихся контактных элементах, изготовленных из различных материалов. Если переменным сделать материал электрощеток и зафиксировать материал коллекторов, изготовив

их из меди, то вольт-амперные характеристики приобретут вид, показанный на рис. 3-4,*б*. Здесь видны качественные и главным образом количественные различия изображенных кривых и явная их зависимость от марки электрощеточного материала. Линия *6* получена при соответствующих испытаниях электрографитированных

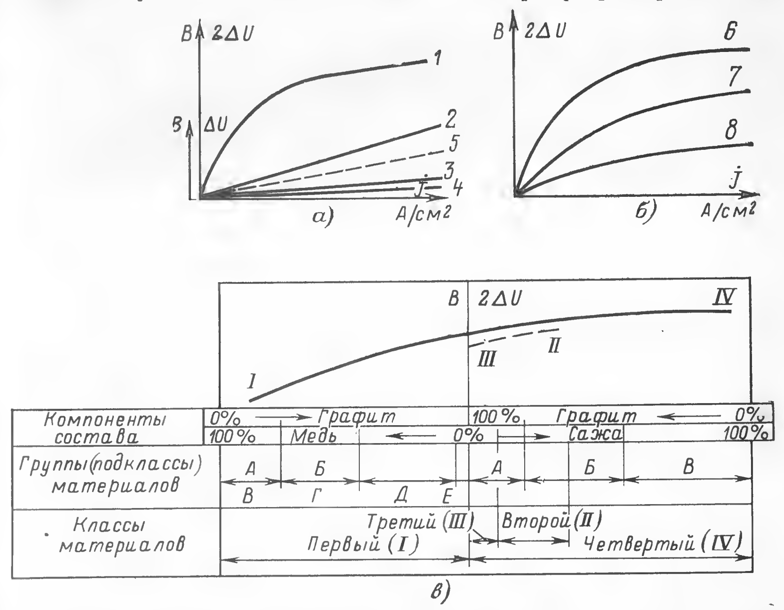


Рис. 3-4. Влияние материала контактных колец (*а*), плотности тока в контакте (*б*) и состава электрощеток (*в*) на переходное падение напряжения в скользящем контакте.

электрощеток, линия *7* — натуральнографитных, а линия *8* — медно-графитных. Графики, подобные изображенным на рис. 3-4,*б*, приводятся в каталогах многих фирм, изготавливающих электрощетки. Эти графики используются для расчета электрических потерь в скользящем контакте. Для упрощения расчетов в последнее время предпринимаются попытки описать подобные графики с помощью специально подобранных эмпирических формул. Впервые подобная попытка была осуществлена автором в 1958 году. Воспользовавшись статистико-математическими методами и подвергнув корреляционному анализу результаты многолетних массовых испытаний электрощеточных материалов отечественного производ-

ства, автор предложил описывать статические вольт-амперные характеристики электрощетки с помощью формулы следующего вида:

$$2\Delta U = A + Bj, \quad (3\text{-}6)$$

где j — текущее значение плотности тока в скользящем контакте; A и B — свободный член и угловой коэффициент уравнения, значения которых зависят от состава материала электрощеток (табл. 3-1).

Таблица 3-1

Угловые коэффициенты B и свободные члены A в уравнении вольт-амперной характеристики для электрощеточных материалов

Марка материала	A	B	Марка материала	A	B	Марка материала	A	B
Г1	1,50	0,07	ЭГ74	1,30	0,09	МГ	0,06	0,007
Г3	1,20	0,05	611М	1,20	0,05	МГ2	0,20	0,01
ЭГ2А	1,50	0,10	М1	0,90	0,03	МГ4	0,60	0,02
ЭГ4	1,10	0,09	М3	1,00	0,05	МГ64	0,16	0,01
ЭГ8	1,90	0,07	М6	0,90	0,03	МГС5	0,90	0,03
ЭГ14	1,80	0,07	М20	1,00	0,05			

Предложенная формула удобна для расчетов, но обладает тем недостатком, что является справедливой для областей, прилегающих к номинальным значениям плотности тока. Точнее, она справедлива для электрощеток «черных» (без металла) материалов при $4 < j < 20$ А/см², а для «цветных» (содержащих металл) при $8 < j < 24$ А/см².

В [Л. 3-15] для описания статических вольт-амперных характеристик предложена формула вида

$$2\Delta U = Cj^m, \quad (3\text{-}7)$$

где физический смысл параметров C и m совершенно аналогичен тому, который имели параметры A и B в (3-6) (численные значения этих параметров не совпадают).

Степенная формула обладает тем достоинством, что описывает кривую $2\Delta U = f(j)$ на всем участке ее изменения. Рассматривая влияние состава электрощеточного материала на вид и положение вольт-амперных характеристик, нужно иметь в виду, что этот состав не может не влиять и на номинальные значения переходного падения напряжения. Степень этого влияния изображена на рис. 3-4,*в*, из которого следует, что по мере замещения в составе электрощеточного материала меди графитом, а затем графита сажей происходит последовательное возрастание значений $2\Delta U$. Исключение из этого правила составляет только крайний правый участок линии (рис. 3-4,*в*). Факт возрастания значений $2\Delta U$, обусловленный отмечаемой последовательностью замещения в составе электрощеточного материала различных компонентов состава, связан с соответствующими изменениями величин Δu_2, Δu_3, Δu_4, Δu_5, Δu_6, Δu_{12}, Δu_{13}, Δu_{14}, Δu_{15} и Δu_{16}. Наиболее значительным является влияние величин Δu_4, Δu_5, Δu_{13} и Δu_{14}. Последнее обстоятельство связано со значениями удельного электрического сопротивления меди, графита и сажи, являющихся основными компонентами электрощеточных материалов и оказывающих влияние на состав верхнего слоя политуры.

Дальнейшее рассмотрение вопроса приводит к необходимости изучения физического строения этих материалов. Здесь только отметим, что общая закономерность изменения значений характеристики $2\Delta U$ от соотношения компонентов состава электрощеточных материалов может быть изменена путем применения в качестве связующего вещества синтетических смол. За счет использования последних удается создавать электрощеточные материалы, переходное падение напряжение которых достигает 5,0—5,5 В.

Рассмотренные закономерности описывали влияние на величину переходного падения напряжения в скользящем контакте $2\Delta U$ относительной скорости перемещения элементов контакта, их полярности, коллекторной политуры и состава электрощеточного материала. Между тем при изложении механизма прохождение носителей тока через зону контакта отмечались и другие факторы, оказывающие влияние на этот процесс. Особый практический интерес среди них представляют давление между контактирующими элементами p, высота над уровнем моря H и температура T. Возрастание p до 300 гПа (кгс/см²) вызывает снижение величины $2\Delta U$ по гиперболическому закону. В интервале изменения H до 12 км значение $2\Delta U$ уменьшается по закону прямой линии.

Описываемые изменения характеристики $2\Delta U$ в зависимости от p и H объясняются относительно просто: по мере возрастания удельного нажатия происходит пере-

распределение путей прохождения тока через различные участки зоны контакта. Уменьшается доля последовательно расположенных составляющих Δu_{41}, Δu_{42} и Δu_{43}, и возрастает та часть тока, которая образует Δu_{44}. Аналогичное перераспределение происходит под электрощеткой и другой полярности, где уменьшается ток, создающий слагаемые Δu_{141}, Δu_{142} и Δu_{143}, и возрастает ток, образующий Δu_{144}. Другим следствием возрастания нажатия является более интенсивное воздействие со стороны электрощеток на политуру и механическое повреждение последней, в результате чего снижаются значения составляющих Δu_5, Δu_6, Δu_7, Δu_{11}, Δu_{12} и Δu_{13}. Влияние высоты обусловлено изменением состояния атмосферы. Известно, что по мере возрастания H до 30—35 км существенно снижается температура воздуха, а следовательно, и абсолютное количество находящихся в нем водяных паров. При этом, естественно, замедляются и даже совсем прекращаются электролитические процессы в скользящем контакте и исчезает политура. Этот факт сам по себе является достаточным для снижения значений $2\Delta U$ (рис. 3-4,*а*). Сопутствующим является также факт некоторого увеличения средней длины свободного пробега молекул воздуха, что облегчает условия прохождения носителей тока через зазор.

Более сложной и еще недостаточно изученной является связь между $2\Delta U$ и температурой контакта T.

Опубликованные в [Л. 3-9] графики характеризуют рассматриваемую связь и отличаются от ранее описанных аналогичных графиков тем, что кроме минимума, располагающегося в области $T \approx 80\,°C$, имеют правую восходящую ветвь, на которой значения $2\Delta U$ превышают таковые на «холодном» коллекторе. Столь своеобразный характер воздействия температуры на показатель $2\Delta U$ объясняется тем, что она оказывает влияние не только на описанные ранее процессы в скользящем контакте, но и в некоторой степени оценивает свойства материалов контактирующих элементов. Последнее связано прежде всего с различиями знаков температурного коэффициента сопротивления меди и углеродистых материалов. В интервале температур, при которых протекает эксплуатация элементов электрического скользящего контакта, 50—300 °C знак температурного коэффициента меди является положительным. Углеродистые материалы обладают температурным коэффициентом с отрицательным знаком.

Повышение температуры вызывает возрастание электрической проводимости полупроводникового слоя политуры, но при этом сам слой образуется с большей интенсивностью [Л. 3-10]. Все перечисленные явления и процессы вызывают изменение практически всех составляющих Δu_1, $\Delta u_2, \ldots, \Delta u_{17}$, образующих суммарную величину $2\Delta U$. Если при этом учесть, что степень нагрева оказывает влияние на параметры состояния среды, в которой протекает эксплуатация скользящего контакта, то описываемый характер зависимости $2\Delta U = f(T)$ получает свое логическое объяснение.

Рассмотренное влияние H на характеристику $2\Delta U$ не исчерпывает всех сведений, необходимых для обеспечения нормальной работы скользящего контакта при использовании его на электрооборудовании высотных самолетов и летательных аппаратов. Для обеспечения такой работы необходимы более подробные исследования явлений, происходящих в контакте при подъеме его в верхние слои атмосферы.

Результаты одного из таких исследований, выполненных В. Девисом [Л. 3-11], представлены на рис. 3-5. Первый график (рис. 3-5,*а*) иллюстрирует характер изменения величин ΔU двух нагруженных током электрощеток различной полярности при изменении давления сухого кислорода, в среде которого они испытывались. Введение в кислород различных количеств водяного пара по-разному влияет на величину ΔU. Как следует из рис. 3-5,*б* и *в*, у анодно-поляризованных электрощеток подобное обстоятельство приводит сначала к снижению значений изучаемой характеристики, а затем по мере увеличения парциального давления водяного пара свыше 5,3 гПа (4 мм рт. ст.) оно снова начинает возрастать. Под катодно-поляризованной электрощеткой (рис. 3-5,*а*) ΔU изменяется в том же направлении, что и давление водяного пара.

Влияние токовой нагрузки на ΔU при работе скользящего контакта в среде сухого кислорода прослеживается путем сопоставления на рис. 3-5,*а* линий, снятых при токе $I=10$ А и $I=20$ А. Из этого сопоставления видно, что при повышении токовой нагрузки соответственно возрастают и ΔU, причем в данном случае $\Delta U_+ > \Delta U_-$. Характер выявленных соотношений продолжает сохраняться и в случае, когда скользящий контакт работает при различных давлениях кислорода и различных давле-

ниях содержащихся в нем водяных паров (рис. 3-5,*г, д, е*). Что касается количественной оценки рассматриваемого явления, то она несколько осложнена. Катодно-поляризованная электрощетка при $p_к = 13$ Па (0,1 мм рт. ст.) не реагирует на повышение содержания водяного пара (рис. 3-5,*г*) и только при $p_к \geqslant 260$ Па (2 мм рт. ст.) эта

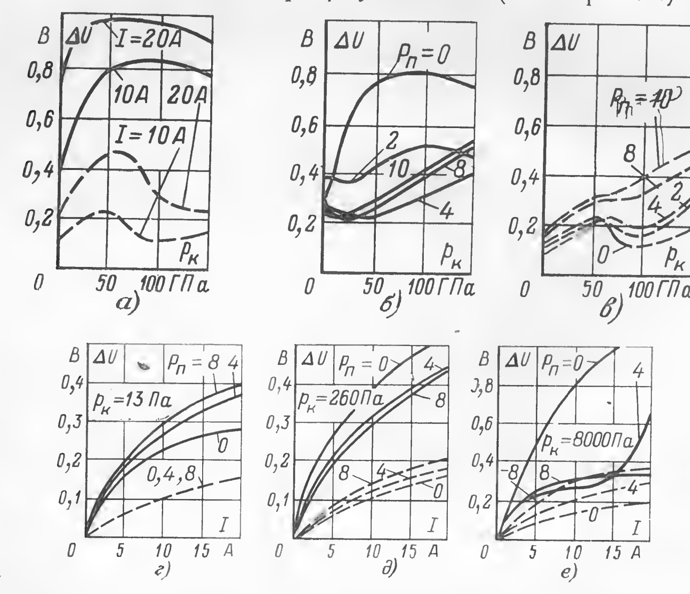


Рис. 3-5. Влияние парциального давления водяного пара $p_п$ кислорода $p_к$ и токовой нагрузки I на характеристику ΔU.

—— — анодно-поляризованные электрощетки; — — — — катодно-поляризованные электрощетки (у кривых проставлены значения парциального давления водяного пара $p_п$).

реакция проявляется повышением значений ΔU (рис. 3-5,*д,е*). По-иному происходит изменение рассматриваемой характеристики под анодно-поляризованной электрощеткой. Так, при $p_к = 13$ Па (0,1 мм рт. ст.) повышение давления водяного пара вызывает возрастание значений ΔU (рис. 3-5,*г*), тогда как при других давлениях $p_к$ эти пары снижают ΔU (рис. 3-5,*д, е*). Общим для всех изображенных на последнем рисунке зависимостей является сохранение ранее выявленной закономерности изменения $\Delta U = f(j)$ при наличии политуры на поверхности скольжения коллектора или кольца. Последнее явле-

ние легко объясняется, если вспомнить, что все изображенные на рис. 3-5 построения получены в результате наблюдений за скользящими контактами, работающими в присутствии активного окислителя — кислорода. В неокисляющих бескислородных средах абсолютное значение величины $2\Delta U$ относительно невелико и постоянно. Уменьшение значений $2\Delta U$ по сравнению с воздушной атмосферой вызывает также восстановительная среда водорода. Присутствие или отсутствие влаги в этих средах на величину $2\Delta U$ сколько-нибудь существенного влияния не оказывает. Эта величина сохраняет свое малое значение и в контакте, работающем в вакууме. Вид кривой $2\Delta U = f(j)$ электрического контакта, эксплуатируемого в условиях вакуума, практически не отличается от того, который наблюдается при использовании его в обычной среде при атмосферном давлении. Если в среде, окружающей контакт, появляется даже весьма незначительное количество кремнийорганических соединений, величина $2\Delta U$ резко возрастает [Л. 3-12, 3-13]. Аналогичным образом проявляют себя так называемые пропитывающие вещества, вводимые в электрощеточные материалы [Л. 1-4, 3-14]. В качестве подобных веществ в промышленности используются органические и неорганические химические соединения и металлы. Среди предложенных и апробированных пропитывающих веществ находятся: дисульфид молибдена, пирофосфат натрия или какого-либо другого щелочного металла, соединения металлов с высшими кислотами жирного ряда, каменноугольный пек, высокомолекулярные хлорированные углеводороды, смесь гигроскопической соли с органическими нитросоединениями, смесь ненасыщенных полиэфирных смол, фторид бария и другие. Все применяемые пропитывающие вещества повышают значения $2\Delta U$ на 10—20% [Л. 3-15].

Одной из новых областей применения скользящего контакта является использование его в электрических машинах, наполненных жидким диэлектриком (погружные машины). Особенность работы контакта в подобных условиях состоит в том, что между вращающимся коллектором и электрощеткой возникают расклинивающие гидродинамические усилия, величина которых даже при относительно небольших окружных скоростях коллектора ($v = 4 \div 6$ м/с) превышает обычно применяемые нажатия на электроугольные изделия. Распределяются

эти усилия таким образом, что их максимум в отличие от случая работы контакта в воздушной среде смещается не в сторону набегающего края контактной поверхности электрощетки, а в сторону ее сбегающего края. Наличие в контактной зоне гидродинамических усилий снижает устойчивость контакта в тем большей степени, чем большим является угол обхвата коллектора электрощеткой, т. е. чем больше ширина последней. Для нейтрализации действия расклинивающих усилий в теле электрощетки просверливаются аксиальные каналы, выходящие на контактную поверхность. Отрегулировав описанным образом работу контакта и проведя определение значений $2\Delta U$, авторы [Л. 3-16] установили, что рассматриваемая величина при использовании контакта в среде трансформаторного масла существенно превысила значения, получаемые при использовании контакта в воздушной атмосфере (табл. 3-2).

Таблица 3-2

Изменение переходного падения напряжения при работе скользящего контакта в среде трансформаторного масла

Марка электрощеток	Значение $2\Delta U$, В, при работе контакта	
	в воздушной среде	в среде трансформаторного масла
Т2, Г3, ЭГ2А, ЭГ4, ЭГ14	1,9—2,6	3,0—4,2
МГ	0,2	0,28—0,44
М1	1,4	2,5—2,8
МГСО	0,17	0,25—0,48

Подобный результат обусловлен возрастанием значений ранее описанных членов Δu_4 и Δu_{14}, являющихся составляющими общего переходного падения напряжения $2\Delta U$. Отмечаемое возрастание обязано своим происхождением появлению в контактной зоне изолирующего слоя трансформаторного масла.

Результаты исследования других факторов, влияющих на рассматриваемую характеристику контакта, работающего в среде жидкого диэлектрика, освещены в [Л. 3-17 — 3-19]. Материалы этих исследований приводят к следующим выводам: а) статические вольт-амперные характеристики погружного контакта, будучи нелинейными, при использовании на медном коллекторе электрощеток из «черных» материалов, постепенно

спрямляются по мере того, как в их составе углеродистые компоненты заменяются металлическими; б) величина $2\Delta U$ при работе на коллекторе из стали на 15—25% больше, чем на коллекторе из меди; в) на величину $2\Delta U$ оказывает влияние окружная скорость коллектора. Это влияние особо проявляет себя в области малых значений v и затухает в области больших его значений; г) величина $2\Delta U$ в очень сильной степени зависит от удельного нажатия на электрощетки; по мере возрастания p величина $2\Delta U$ снижается, стремясь к некоторому установившемуся пределу; д) в изученном интервале повышения температур 20—100 °C значения $2\Delta U$ снижались; е) полярные свойства электрощеток из черных материалов выражены в большей степени, чем цветных; ж) для электрощеток из цветных материалов справедливо соотношение $\Delta U_{-} < \Delta U_{+}$.

Приведенные здесь выводы свидетельствуют о том, что действие рассмотренных факторов на характеристику $2\Delta U$ при работе контакта в среде жидкого диэлектрика качественно не отличается от влияния, наблюдаемого в воздушной среде. Исключение составляет окружная скорость коллектора, возрастание которой при удовлетворительном состоянии поверхности скольжения не вызывает повышения значений $2\Delta U$ в воздушной среде.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ МЕЖДУ ЭЛЕМЕНТАМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СКОЛЬЗЯЩЕГО КОНТАКТА

Описанный ранее показатель переходного падения напряжения самым непосредственным образом был связан с электрическими явлениями в скользящем контакте. Анализируемый здесь коэффициент трения μ характеризует механическое и молекулярное взаимодействие между поверхностями контактирующих элементов. Первое из названных взаимодействий обязано своим происхождением упругому и пластическому деформированию поверхностей трущихся тел, происходящему под влиянием весьма значительных давлений в зоне фактического контакта. Молекулярное взаимодействие обусловлено силами связи атомов кристаллических решеток, сближенных тел. Подобная связь возникает благодаря тому, что на тесно сближенных участках контакта обнажается чистая, свободная от смазки и окислов поверхность кристалла вещества, слагающего контактирующие тела. Внешним проявлением описываемых взаимодействий между элементами скользящего контакта является возникновение между ними сил трения и их изнашивание. Величины силы трения

и связанного с ней коэффициента трения зависят от ряда факторов.

Экспериментальное определение коэффициента трения μ обычно производится на тех же установках, которые используются для определения характеристики $2\Delta U$. Опыт состоит в том, что испытуемые электрощетки нагружаются номинальными током $I_н$ и давлением $p_н$ и при определенном значении окружной скорости v на поверхности скольжения испытательного стенда определяется номинальный коэффициент трения $\mu_н$. Испытания производят в лабораториях предприятий, изготавливающих электрощетки, и получаемые при этом данные используются в стандартах, технических условиях и каталогах на соответствующие виды продукции.

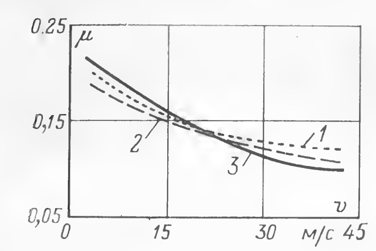


Рис. 4-1. Фрикционные характеристики различных электрощеточных материалов.

1 — металлографитная электрощетка; *2* — графитная электрощетка; *3* — электрографитированная электрощетка.

С целью более полного описания характеристики μ в промышленности широко распространены испытания по определению влияния на нее окружной скорости на поверхности скольжения. Подобные испытания (при номинальных токовых нагрузках на электрощетки и при номинальных давлениях на них) позволяют строить графики, подобные изображенным на рис. 4-1. Эти графики строятся по данным массовых испытаний и приводятся во многих каталогах крупнейших электрощеточных фирм. Особенно важным в описываемых графиках является их ориентировка по отношению к координатным осям. Очевидно, что чем ближе к горизонтали располагается линия $\mu=f(v)$, тем более устойчивой будет работа контактных элементов при всяких изменениях скорости их относительного перемещения. В зарубежной технической литературе для описания фрикционных характеристик рекомендуется формула вида

$$\mu=Av^{-s}, \qquad (4\text{-}1)$$

где A и s — константы, зависящие от марки электрощеточного материала [Л. 3-15].

В отечественной литературе для этих же целей предложена формула

$$\mu=C-Dv, \qquad (4\text{-}2)$$

где константы C и D имеют тот же смысл, что и константы A и s в (4-1); значения констант C и D для ряда марок электрощеточных материалов, справедливые при окружных скоростях до 30—35 м/с, приведены в табл. 4-1.

По поводу достоинств и недостатков двух последних формул можно повторить все то, что отмечалось несколько ранее при описании аналогичных выражений (3-6) и (3-7), относящихся к вольт-амперным характеристикам скользящего контакта.

Таблица 4-1

Значения угловых коэффициентов D и свободных членов C в уравнении фрикционной характеристики электрощеточных материалов

Марка материала	C	D	Марка материала	C	D	Марка материала	C	D
Г3	0,25	0,005	611М	0,21	0,004	МГ2	0,23	0,004
ЭГ2А	0,21	0,003	М1	0,23	0,004	МГ4	0,21	0,004
ЭГ4	0,20	0,003	М3	0,20	0,003	МГ64	0,22	0,004
ЭГ8	0,22	0,005	М6	0,19	0,003	МГС5	0,21	0,004
ЭГ14	0,23	0,005	М20	0,20	0,003			
ЭГ74	0,26	0,006	МГ	0,22	0,004			

Закономерности изменения коэффициента трения μ в зависимости от плотности тока j и удельного давления на электрощетки p при разном направлении проходящего через них тока изучались рядом исследователей. Одним из первых авторов, осветивших этот вопрос, является инж. Ю. В. Буткевич [Л. 4-1]. Выполненные им во Всесоюзном электротехническом институте эксперименты дали результат, изображенный на рис. 4-2 [для разных материалов электрощеток: графитного (*а*), металлографитного (*б*), угольно-графитового (*в*) и угольного (*г* и *д*) использовалось контактное кольцо из латуни при окружной скорости $v=10$ м/с] (на позициях *в*, *г* и *д* сплошные линии относятся к анодно-поляризованным, а пунктирные — к катодно-поляризованным электрощеткам). Показанные здесь графики свидетельствуют о том, что рассматриваемые закономерности для различных марок электрощеточных материалов являются различными. Так, в случае электрощеточных материалов I и III классов, определяемых в табл. 1-2, значение μ от плотности тока в контакте совершенно не зависит. Положение существенно изменяется в случае, когда электрощетки изготовлены из материалов II класса. В последнем случае ток проявляет себя как смазывающее вещество, снижая μ. Подобный результат в свое время был объяснен повышенным искрением твердых электрощеток и вызванным этим увеличением скорости их изнашивания. В результате в зоне контакта появляется значительное количество продуктов износа электрощеточного материала, которые преобразуют режим его работы, заменяя трение скольжения трением качения. Приведенное объяснение было опубликовано Ю. В. Буткевичем в 1928 г. Оно является, по сути дела, предшественником теории Р. Мейера, которая связывает с присутствием в зоне скользящего контакта продуктов износа электрощеток наряду с характеристикой $2\Delta U$ и характеристику μ [Л. 3-3].

Взгляды Ю. Буткевича и Р. Мейера по вопросу о влиянии параметра j на μ не разделяются И. Ланкастером и И. Стенлеем. Последние авторы объясняют рассматриваемое влияние специфическими свойствами порошковых материалов и считают, что уменьшение μ протекает одновременно с уменьшением переходного сопротивления нагружаемых током контактов. Оба явления связаны с окислением контактирующих поверхностей и вызываемым этим окислением снижением размеров реальной площади контакта при

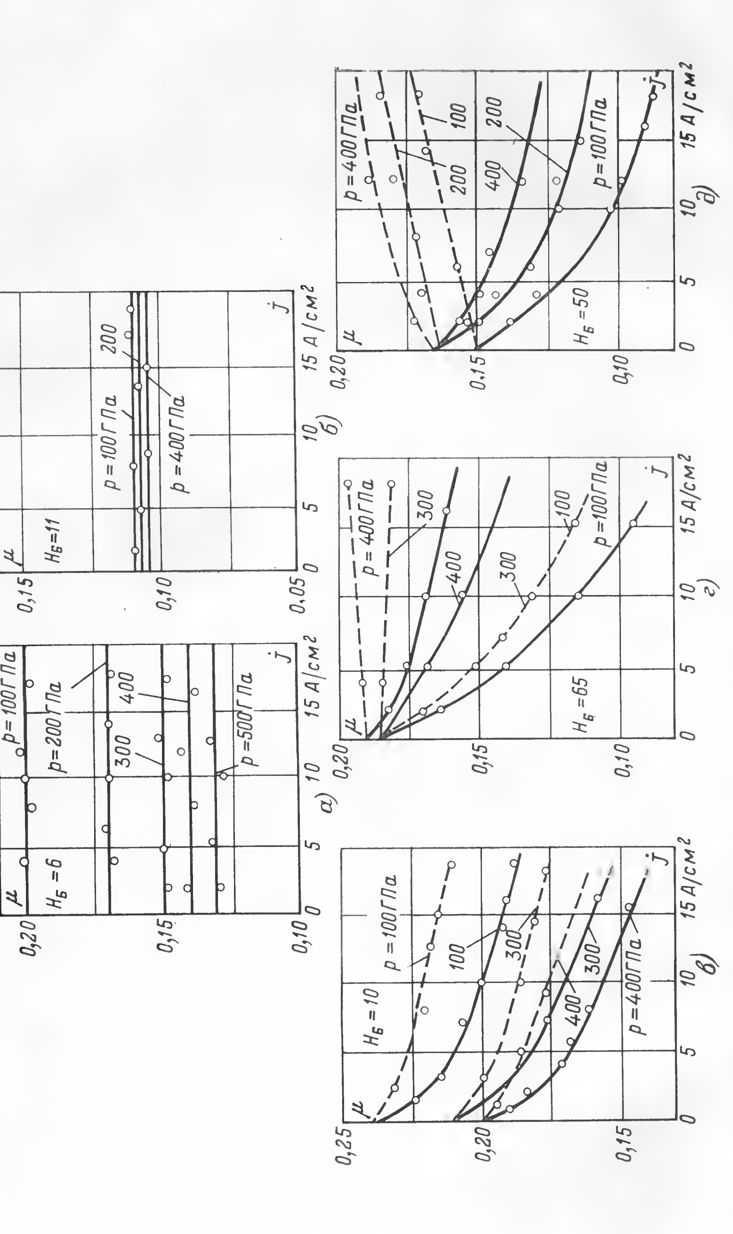
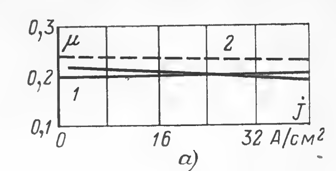


Рис. 4-2. Изменение коэффициента трения в зависимости от плотности тока при различных значениях удельного давления на электрощетки.

одновременном возрастании числа индивидуальных площадок контакта. Определенная роль отводится также и температуре нагрева контактной зоны [Л. 4-2].

Влияние удельного давления оказывается ощутимым для графитных и угольно-графитных электрощеток во всем диапазоне изменения j и для угольных электрощеток при $j>0$. При холостом ходе ($j=0$) в последнем случае кривые исходят почти из одной точки, т. е. параметр p на μ влияния не оказывает. Последнее положение распространяется также и на медно-графитные композиции. Описываемые закономерности Ю. В. Буткевич объясняет



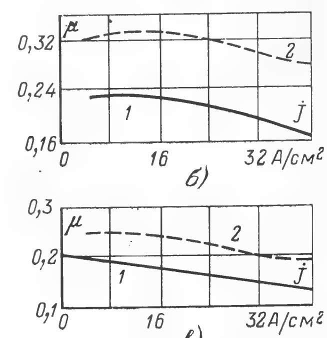


Рис. 4-3. Изменение коэффициента трения в зависимости от плотности тока при работе электрощеток на коллекторах из разных материалов [Л. 3-8] и разных марок щеток.

а — ЭГ4; *б* — ЭГ2А; *в* — ЭГ74; *1* — на коллекторе из меди марки М1; *2* — на коллекторах из того же материала, что и электрощетки

теми же причинами, что и воздействием j на μ: по мере повышения p у электрощеток из мягких материалов (графитных и угольно-графитных) увеличивается количество продуктов износа в зоне контакта и работа последнего переходит из режима трения скольжения в режим трения качения. У электрощеток, изготовленных из твердых материалов (угольных и медно-графитных) возрастание p отмечаемого изменения режима трения в контакте не вызывает. Малые значения p вызывают соответственно и меньшие значения μ.

Описанная на рис. 4-2,*а*, *б*, *в* обратно пропорциональная зависимость между μ и p является характерной для большинства пар трения, образованных металлами, сплавами, текстильными материалами и др. [Л. 4-3]. По современным воззрениям она объясняется тем, что площадь фактического контакта возрастает медленнее, чем прилагаемая нагрузка. Показанная на рис. 4-2,*г* и *д* прямо пропорциональная связь между рассматриваемыми характеристиками удовлетворительного объяснения пока не получила.

Графики на рис. 4-2,*в*, *г* и *д* содержат дополнительную информацию о влиянии направления тока в скользящем контакте на величину μ. При прохождении тока от электрощетки к кольцу (т. е. под анодно-поляризованной электрощеткой) μ оказываются всегда меньшими, чем под катодно-поляризованной электрощеткой, причем

во всех случаях с ростом j наблюдается снижение μ. Коэффициент трения под электрощеткой-катодом, удовлетворяя неравенству $\mu_{-}>\mu_{+}$, при возрастании тока может изменяться по-разному: снижаться (рис. 4-2,*в*), или оставаться постоянным (рис. 4-2,*г*), или возрастать (рис. 4-2,*д*).

Неравенство $\mu_{-}>\mu_{+}$ находит свое объяснение в различии состояния поверхностей скольжения под различным образом поляризованными электрощетками. Металлическая поверхность под электрощеткой-катодом всегда более шероховата. Физика явлений, изображенных на рис. 4-2,*г* и *д* под катодно-поляризованными

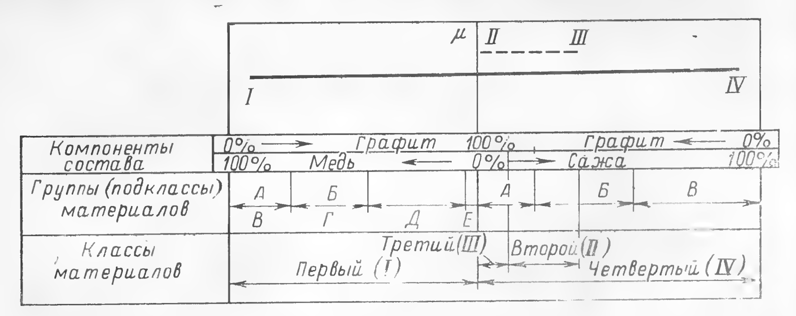


Рис. 4-4. График зависимости номинального значения коэффициента трения от состава электрощеточных материалов.

Условия испытаний: материал коллектора — медь; окружная скорость 15 м/с; плотность тока и удельное давление по ГОСТ 2332-63.

электрощетками, связана с природой угольных материалов. Введение в состав электрощетки графита устраняет отмечаемую особенность в изменении характеристики $\mu=\varphi(j)$ (рис. 4-2,*в*).

Отмеченная на некоторых графиках рис. 4-2 связь между особенностями изменения коэффициента трения и природой электрощеточных материалов далеко не исчерпывает вопроса о влиянии на коэффициент трения контактирующих элементов. Относящиеся к этому вопросу дополнительные сведения приведены на рис. 4-3 и 4-4. На первом из них показано, как изменяется μ при работе электрографитированных электрощеток на коллекторе из меди и из тех же материалов, из которых изготовлены электрощетки. Оказалось, что, как и в общей теории трения, значения μ для пары из одноименных материалов являются более высокими, чем при разноименных. На рис. 4-4 показана общая закономерность изменения значений μ для электрощеточных материалов различного состава, работающих на медном коллекторе. Если отвлечься от некоторого крайне незначительного рассеивания экспериментальных точек, то можно заключить, что для всего возможного интервала изменений состава порошковых композиций значения μ остаются практически постоянными. Оценивая подобный результат, следует иметь в виду одну особенность, связанную с методикой экспериментального определения значений коэффициента трения. Упомянутая особенность состоит в том, что при проведении соответствующих испытаний контактирующие элементы нагружены током. Величина тока выбирается так, чтобы удельная токовая нагрузка на

единицу площади контакта соответствовала номинальной для данного контактного материала плотности тока $j_н$. Для порошковых контактных материалов IV класса и для материалов группы Д I класса номинальные плотности тока являются практически одинаковыми. По мере перехода к материалам, расположенным в левой части оси абсцисс рис. 4-4, т. е. по мере перехода к материалам, содержащим в своем составе все большее количество меди, номинальные плотности тока возрастают. Последнее обстоятельство, как это следует из рис. 4-2, приводит к снижению значений μ. В результате общий характер зависимости коэффициента трения от состава порошковых композиций при их использовании в реальных условиях эксплуатации, т. е. при номинальной токовой нагрузке, оказывается таким, как это показано на рис. 4-4.

Наблюдаемое в ряде случаев влияние плотности тока на величину μ связано, как отмечалось в [Л. 4-1], с температурными явлениями в зоне контакта. График, описывающий зависимость μ от температуры T, имеет г-образный вид. Левая восходящая ветвь этого графика располагается в области изменения температуры от 30 до 70 °C. В области $70°<T<90$ °C происходит резкое, почти трехкратное снижение значения μ. При изменении T от 90 до 110 °C величина μ сохраняется постоянной, при $T=150$ °C и более снова начинает возрастать. Описанный вид кривой $\mu=f(T)$, относящейся к электрографитированным электрощеткам, работающим на нагретом медном коллекторе, впервые был получен С. В. Глассом в 1937 г. [Л. 4-4]. Более поздние опыты И. Стенлея для аналогичных материалов контактной пары подтвердили описанный характер изменения μ на участке изменения температуры до 65 °C, но при дальнейшем повышении T этот автор наблюдал снижение μ до минимума, который наступал при $T=155$ °C. Уменьшение μ при $T>110$ °C объяснялось образованием окисных чешуек графита на поверхности меди, которые снижают сопротивление сразу на поверхности раздела окисной пленки и меди [Л. 4-5]. Р. Мейер в своих работах отрицает наличие существенных изменений значений μ при температурах до 100 °C.

Разнообразие описываемых взглядов на характер зависимости $\mu=f(T)$ нашло себе объяснение в работе [Л. 4-6], где показано, что при малом содержании влаги в атмосфере справедливы закономерности, описанные Глассом. Когда это содержание повышается до 13 г/см³, становится справедливым вывод Р. Мейера.

Коэффициент трения, возникающий при совместной работе элементов электрического скользящего контакта, не остается безразличным к изменению состояния окружающей среды, причем это состояние может определяться механическими примесями, химическим составом и термодинамическими параметрами. Так, например, при работе электрографитированных электрощеток на медном коллекторе при загрязнении атмосферы, окружающей контакт, значения μ изменяются так, как это указано в табл. 4-2.

Аналогичные изменения наблюдаются при введении в атмосферу кремнийсодержащих веществ, паров хлора, кислот, красок, скипидара, ацетона, спирта и т. п.

Только что описанные случаи загрязнения атмосферы химическими примесями (их называют контактными ядами) вызывали возрастание коэффициента трения. Значительно более сложным является комплексное воздействие химических и термодинамических факторов. Изучение влияния на рассматриваемую характеристику

Таблица 4-2

Начальное значение μ	Наименование вещества, введенного в атмосферу, окружающую контакт	Конечное значение μ
0,18	Табачный дым	0,31
0,20	Дым от горящей изоляции, опрыскиваемой огнетушителем	0,60
0,13	Пары четыреххлористого углерода	0,25

парциального давления кислорода $p_к$ при различных давлениях содержащихся в нем водяных паров $p_в$ произведено В. Девисом [Л. 3-11] (рис. 4-5). Результаты свидетельствуют о том, что характер этого влияния в свою очередь определяется величиной и направлением проходящего через контакт тока. Для бестоковых электрощеток и для электрощеток катодно-поляризованных возрастание величины $p_к$ при отсутствии в кислороде паров влаги ($p_в=0$) вызывает возрастание μ (рис. 4-5,*а*, *б*, *г*). Повышение давления паров влаги нейтрализует отмечаемое возрастание, и значение последнего перестает зависеть от $p_к$ (рис. 4-5,*б*, *г*). Принципиально по-иному протекает процесс под анодно-поляризованной электрощеткой. Значение μ, будучи независимым от $p_к$ при $p_в=0$ (рис. 4-5,*а*) в интервале $0<p_к<26$ гПа (20 мм рт. ст.), при $p_в>0$ резко возрастает. Темп этого возрастания определяется величиной $p_в$ (рис. 4-5,*в*). Дополнительное изучение рассматриваемых закономерностей с учетом токов, проходящих через контакт (рис. 4-5,*д*, *е*, *ж*), показывает, что и в этих случаях в основном справедливы те же зависимости, которые изображены на других частях последнего рисунка.

Только что рассмотренное воздействие термодинамических факторов на изменение μ предопределяет характер этих изменений, наблюдаемых при подъеме скользящего контакта на высоту. Так, например, при подъеме контакта от уровня моря до высоты 12—15 тыс. м коэффициент трения обычной электрографитированной электрощетки, работающей по медному коллектору, возрастает по закону почти прямой линии от 0,15—0,17 до 0,25—0,30. Для того чтобы нейтрализовать действие высотных условий на изучаемую характеристику, созданы специальные, так называемые высотные электрощетки. Подобные электрощетки изготавливаются либо из специальных металлографитных композиций, в которые кроме порошков меди и графита вводятся легирующие добавки олова и свинца, либо из обычных электрографитированных материалов, в которые вводятся пропитывающие вещества (гл. 3). Эффект, достигаемый введением в металлографитную композицию легирующих добавок характеризуется следующими цифрами [Л. 4-7]:

Высота над уровнем моря, м	0	6 000	12 000	18 000	24 000
Значения μ	0,17	0,12	0,12	0,12	0,13

Описываемое здесь снижение μ при подъеме на высоту обусловлено главным образом присутствием образовавшихся в материале электрощетки легкоплавких компонентов: олова и эвтектики свинец — олово. Именно они наряду с графитом и создают благоприятные условия для смазки скользящего контакта в условиях высоты.

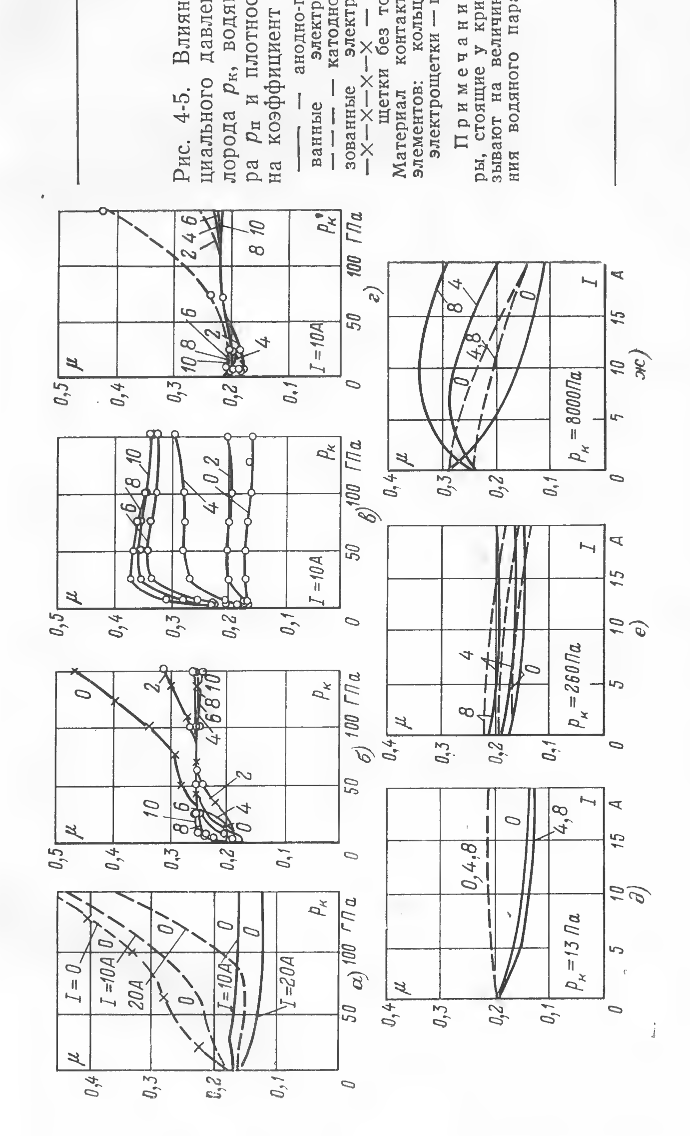


Рис. 4-5. Влияние парциального давления кислорода $p_к$, водяного пара $p_п$ и плотности тока на коэффициент трения.

——— — анодно-поляризованные электрощетки; — — — — катодно-поляризованные электрощетки; —×—×—×— — электрощетки без тока.

Материал контактирующих элементов: кольца — медь; электрощетки — графит.

Примечание. Цифры, стоящие у кривых, указывают на величину давления водяного пара.

Возможности снижения μ электрографитированных электрощеточных материалов при подъеме контакта на высоту за счет введения пропитывающих веществ иллюстрируется данными табл. 4-3, которые не следует рассматривать как доказательство обязательного снижения μ при применении пропитывающих веществ. Последние способны вызывать не только снижение, но и возрастание μ. Для подавляющего большинства пропитывающих веществ колебания изменений μ укладываются в пределы ±30%. Исключение составляют термостойкая смола с пластификатором и смола «мастикс», которые способны снизить μ в 2—4 раза [Л. 4-9, 4-10]. Действие пропитывающих веществ зависит еще и от состояния среды, в которой работает скользящий контакт. Об этом, в частности, свидетельствует политетрафторэтилен, который в наземных условиях не влияет на μ, а в условиях высоты снижает его в 1,5—2,0 раза. Здесь уместно упомянуть о существовании гипотезы, согласно которой эффективность действия пропитывающих веществ на μ повышается по мере увеличения длины молекулярной цепи органического вещества, используемого при пропитке [Л. 1-9]. Помещение скользящего контакта в среду жидкого диэлектрика изменяет природу сил, формирующих коэффициент трения. В данном случае происходит уменьшение сил взаимодействия трущихся поверхностей и появляется новая составляющая, обязанная своим происхождением вязкому сопротивлению среды в зоне контакта. Поскольку первая составляющая уменьшается быстрее, чем возрастает вторая, суммарное сопротивление относительному перемещению снижается и μ уменьшаются до 0,04—0,15 [Л. 3-18]. Влияние удельного давления, окружной скорости, температуры и плотности тока в контакте, находящемся в рассматриваемых условиях, остается примерно таким же, каким оно было в воздушной среде.

Изложенные здесь экспериментальные данные о коэффициенте трения между элементами электрического скользящего контакта свидетельствуют о том, насколько названная характеристика чувствительна к изменению условий, в которых протекает его работа. Указанное крайне затрудняет создание какой-либо общей теории, охватывающей все известные факты об особенностях изменения коэффициента трения в рассматриваемых условиях.

Таблица 4-3

Изменение коэффициента трения пропитанных электрощеток при работе на разных высотах

Марка электрощеток	Пропитывающее вещество	Высота над уровнем моря, м					Источники
		0	6 000	12 000	18 000	24 000	
46C/EG9	Политетрафторэтилен	0,17—0,22	—	—	0,19—0,21	0,08—0,11	[Л. 4-8]
FIB	Политетрафторэтилен	—	—	—	0,18—0,21	0,04	[Л. 4-8]
GSFI	Политетрафторэтилен	0,25	—	—	0,17	0,17—0,18	[Л. 4-8]
ЭГ74	Дисульфид молибдена*	0,12	0,11	0,11	0,10	0,08	[Л. 4-7]

* Введен в тело электрощетки в виде „пробок".

ГЛАВА ПЯТАЯ
ИЗНОС ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СКОЛЬЗЯЩЕГО КОНТАКТА

Рассмотренные ранее характеристики переходного падения напряжения $2\Delta U$ и коэффициента трения μ, будучи чрезвычайно важными для обеспечения нормальной работы электрического скользящего контакта, не давали непосредственного представления о его эксплуатационных свойствах. В отличие от них характеристика износа, равно как и рассматриваемые далее коммутационная и вибрационная характеристики, самым непосредственным образом определяет надежность, долговечность и все другие эксплуатационные

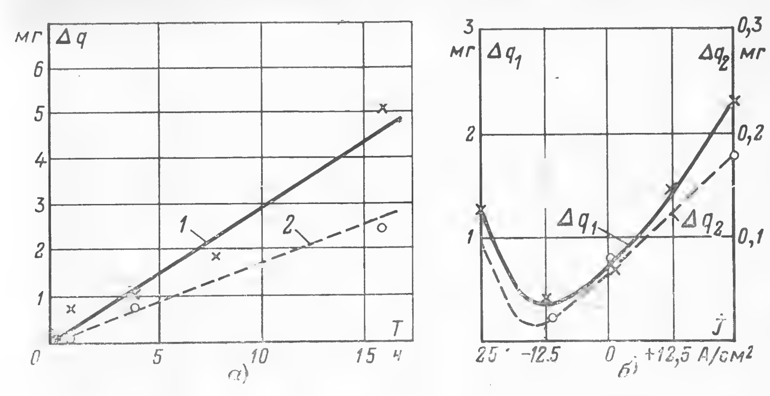


Рис. 5-1. Перенос материала между электрощеткой и коллектором [Л. 5-1].

а — перенос материала с активированных электрощеток положительной (*1*) и отрицательной (*2*) полярности на коллектор; *б* — перенос материала с активированной электрощетки на коллектор (Δq_1) и с коллектора на неактивированную электрощетку (Δq_2).

показатели скользящего контакта. Изучение износа элементов электрического скользящего контакта осуществляется двояким образом. В одном случае исследования производятся на тех же лабораторных установках, на которых изучаются характеристики $2\Delta U$ и μ. В другом случае износы определяются на реальных электрических машинах, находящихся на лабораторных стендах или в нормальной промышленной эксплуатации.

Остановимся вначале на некоторых деталях физического процесса износа элементов электрического скользящего контакта. Исследования с помощью радиоактивных методов [Л. 5-1] показали, что активированное вещество электрощетки переносится на вращающийся коллектор и откладывается на нем не в виде сплошной пленки, а в виде отдельных полосок и островков. В исследовании отмечен также факт вторичного переноса продуктов износа с контактной поверхности коллектора на контактную поверхность другой установленной на нем электрощетки. Оценка отмечаемого явления приведена на рис. 5-1, из которого следует, что массовое количество

переносимого вещества Δq определяется силой и направлением тока, проходящего через контакт.

Данные описываемого опыта позволяют заключить, что перенос материала с анодно-поляризованной электрощетки, который связан с ее износом, происходит примерно в 2 раза более интенсивно, чем со щетки-катода. Однако подобный результат подтверждается далеко не всеми исследователями рассматриваемого вопроса. На

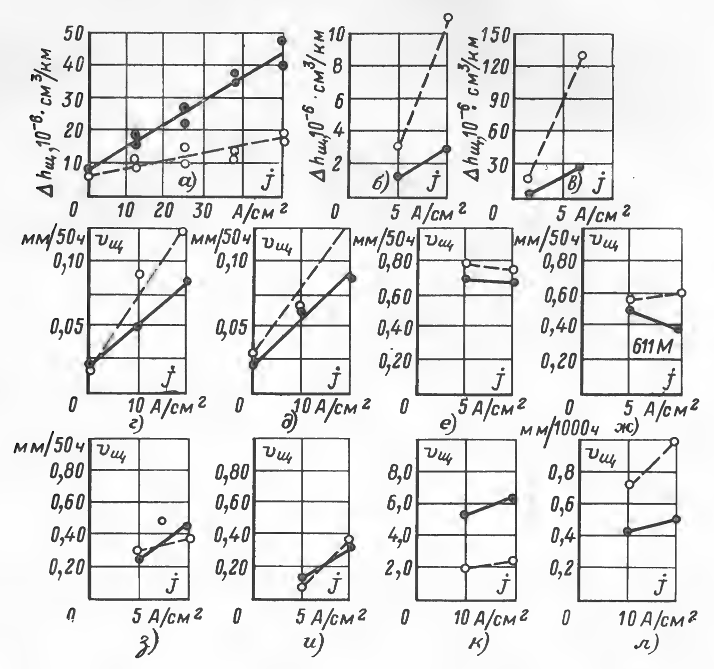


Рис. 5-2. Износ электрощеток разной полярности при различных токовых нагрузках.

——— — анодно-поляризованные электрощетки; — — — — катодно-поляризованные электрощетки.

рис. 5-2 приведены данные ряда авторов, свидетельствующие о том, что имеют место случаи, когда интенсивность износа электрощеток различной полярности противоположна показанной на рис. 5-1. График рис. 5-2,*а* получен при испытании натуральнографитных электрощеток марки НМ6 (фирмы Морганайт) сечением 12,5× ×12,5 мм, работавших на стальных кольцах диаметром 150 мм при n=5 000 об/мин и p=650 сН (гс). На рис. 5-2,*б* показан результат испытания графитных электрощеток на контактных кольцах диаметром 70 мм из меди при v=4,4 м/с и p=300 сН (гс). На рис. 5-2,*в* приведены процессы, характеризующие износ электрощеток из электротехнического графита, испытанных на контактных кольцах при p=350 сН (гс) и v=25 м/с. Кривые на рис. 5-2,*г* и *д* изображают данные, полученные при испытании электрографитированных элек-

трощеток марок ЭГ14 (рис. 5-2,*г*) и ЭГ74 (рис. 5-2,*д*) на медном короткозамкнутом коллекторе при v=18 м/с и p=350 гПа (гс/см²). На рис. 5-2,*е*, *ж*, *з*, *и* приведены данные испытаний электрощеток марок Э14, 611М, ЭГ74 и SA45, на короткозамкнутом коллекторе при v=13 м/с и p=200 гПа (гс/см²). Данные для рис. 5-2,*к* и *л* получены автором при испытании электрощеток с большим содержанием меди (марки МГ64) на коллекторе электрической машины типа АДН и натуральнографитных электрощеток марки 611М, на стальных контактных кольцах синхронного компенсатора. Разнообразие результатов подтверждается также публикациями в Японии и ФРГ. Так, японские авторы сообщили, что различие в полярном износе, подобное показанному на рис. 5-2,*а*, имеет место при испытании на бронзовых кольцах электрощеток «цветных» марок, содержащих в своем составе более 60% медного порошка. Испытания электрощеток с меньшим содержанием меди и электрощеток графитного класса дают результаты, подобные изображенным на рис. 5-2,*б*, *в*, *г* и *д* [Л. 5-2]. По сведениям, опубликованным в ФРГ, влияние полярности на износ электрощеток также связано с их составом: электрощетки из «черных» материалов при использовании на коллекторах влияния полярного эффекта не испытывают; этот эффект особенно отчетливо проявляется при использовании электрощеток из «цветных» материалов на контактных кольцах, причем он будет таким, как это описано в [Л. 5-2].

Столь противоречивые результаты исследования влияния полярности на износ электрощеток объясняются чрезвычайной сложностью явления. Явление простого механического износа само по себе является достаточно сложным. В условиях рассматриваемой задачи на него накладываются еще процессы прохождения тока через скользящий контакт. Последнее существенно осложняет наблюдения и препятствует получению однозначных результатов. Для того чтобы внести ясность в рассматриваемый вопрос, необходимо обратиться к изучению механизма явления. В соответствии с установившимися взглядами износ представляет собою результат динамического* взаимодействия контактирующих элементов; его следствием являются уменьшение размеров этих элементов, изменение состояния поверхностей взаимодействия и, в конечном счете, изменение служебных качеств, находящихся в контакте тел [Л. 5-3, 5-4]. В самом общем виде износ обусловлен действием механических, электрических, химических, и электролитических факторов. Действие механических факторов проявляется путем нарушения связей между частицами перемещающихся относительно друг друга твердых тел. Описываемые нарушения происходят в результате протекания в контакте следующих основных процессов: 1 — микросреза или даже просто среза взаимодействующих при контактировании частиц (абразивный износ или задирание); 2 — молекулярного сцепления этих частиц (фрикционный износ); 3 — пластического оттеснения материала из зоны контактов; 4 — упругого деформирования.

Абразивный износ вызывается выступающими частицами одного из контактирующих элементов, прорезающими поверхность другого контактирующего элемента. При этом с последнего срезаются стружки или отдельные зерна материала. Фрикционный износ обязан своим происхождением молекулярным силам сцепления, действие

* В самом широком смысле этого слова, включая и электродинамическое взаимодействие.

которых проявляется в том, что элементарные площадочки контактирующих тел в какой-то момент времени сцепляются (свариваются) и при дальнейшем относительном перемещении этих тел одно из них теряет частицы слагающего его материала. В последующем эти частицы отделяются также и от того тела, к которому они приварились, и превращаются в продукты износа. Износ, определяемый пластическим оттеснением материала из зоны контакта, связан с действием сил трения, а износ, определяемый упругим деформированием, связан с поверхностной усталостью контактов материалов, происходящей вследствие действия на ограниченных участках действительного контакта повторяющихся деформирующих усилий.

Износ, определяемый действием сил трения и упругим деформированием, Δh может быть определен согласно [Л. 5-3]:

$$\Delta h = \mathrm{const}\ E^{t(1-\beta)-1}\sigma_0^{-t}\mu^t p^{1-\beta t}, \qquad (5\text{-}1)$$

где E — модуль упругости; β — коэффициент, зависящий от микрогеометрии контакта; σ_0 — исходная прочность; μ — коэффициент трения; p — удельная нагрузка на поверхности трения; t — коэффициент, характеризующий противоусталостные свойства материала согласно уравнению

$$n = \left(\frac{\sigma_0}{KT}\right)^t = \left(\frac{\sigma_0}{K\mu p}\right)^t. \qquad (5\text{-}2)$$

Здесь K — постоянная; T — сила трения; n — число циклов до разрушения нагруженного образца.

Доля механической составляющей в общем объеме износа электрощеток оценена в работе [Л. 5-2]. Авторы упомянутой работы считают, что у катодно-поляризованной электрощетки механическая составляющая износа занимает 1/3 общего износа, а у анодно-поляризованной электрощетки даже 1/2.

Действие факторов, определяющих электрический износ элементов электрического скользящего контакта, следует учитывать двояким образом: при отсутствии искрения в контакте и при наличии такового. Все показанные на рис. 5-2 графики построены по данным испытаний электрощеток на контактных кольцах и короткозамкнутых коллекторах, т. е. при отсутствии искрения.

В подавляющем большинстве износ изменялся прямо пропорционально току. Наряду с указанным наблюдались случаи, когда эта общая закономерность нарушалась. Объяснение влияния тока на рассматриваемый процесс содержится в работе Р. Хольма [Л. 1-9], который после ряда оговорок предлагает считать, что ток действует на возрастание износа не сам по себе, а благодаря вызываемому им электрическому пробою (фриттингу) пленки и электролизу. Названные процессы связаны, естественно, с полярностью, и это дает основание Р. Хольму связывать составляющую токового (без искрения) износа с направлением перемещения положительных ионов материала контактирующих элементов. Направление ионов таково, что катионы перемещаются от анодно-поляризованной электрощетки к коллектору и от коллектора к щетке-катоду. Поскольку количество катионов пропорционально току, то сила тока и определяет интенсивность совершаемых ими воздействий. Характер такого воздействия помимо тока будет определяться еще и видом электро-

щеточного материала. В случае, если электрощетки изготовлены из «черных» материалов, в зоне контакта щетки-катода будут выделяться катионы меди, а в зоне контакта анодно-поляризованной электрощетки — катионы угольно-графитного материала. В результате в первой зоне появятся зерна меди и ее окислов, поверхность контакта приобретает шероховатость и произойдет интенсификация износа. Во второй зоне зерен меди и ее окислов не образуется, сюда они заносятся в некотором количестве из первой зоны (рис. 5-1,*б*) и по этой причине анодно-поляризованная электрощетка изнашивается менее интенсивно.

По-иному развивается процесс при использовании электрощеток, содержащих в своем составе значительное количество меди. В данном случае в контактной зоне электрощетки-анода создаются те же условия для образования катионов меди, что и на коллекторе под катодной электрощеткой. Однако поскольку коллектор изготовлен из литого материала, а электрощетка из пористого, то перенос частиц с анодной электрощетки будет большим, чем с кольца. Соответственно окажется большим и ее износ.

При оценке всех только что изложенных положений следует четко представить себе, что износ электрощеток определяется не количеством отделяющегося от них материала, связанным с образованием ионов и крайне незначительным. Этот износ обусловлен механическим воздействием поступающих в зону контакта частиц на контактную поверхность электрощеток. Подобное заключение убедительно подтверждается экспериментами, при которых на дорожке коллектора, оборудованного электрощетками, нагруженными током, находятся «холостые» электрощетки, не несущие тока. Износ «холостых» электрощеток оказывается практически таким же, как и токонесущих.

Безыскровая работа элементов электрического скользящего контакта является только одним из возможных режимов их использо-

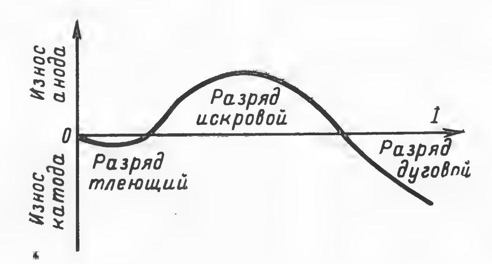


Рис. 5-3. Связь между режимами разряда и износом электродов.

вания. Другим режимом является работа, сопровождаемая искрообразованием. Оценить влияние этого процесса на износ электрощеток можно с помощью рис. 5-3. Общеизвестно, что любая форма самостоятельного электрического разряда в газах сопровождается эрозией электродов. При тлеющем и дуговом разряде преобладает изнашивание катода; искровой разряд приводит к изнашиванию анода. Переход одной формы разряда в другую всегда сопровождается инверсией электрического износа электродов. Искровой разряд представляет собой импульс электрического тока, продолжительность

которого не превышает 10^{-3} с. Место приложения искрового импульса всегда строго локализовано. По степени концентрации энергии взрыва искровой импульс во много раз превышает наиболее мощные взрывчатые вещества [Л. 5-5]. Участок анода, воспринявший искровой разряд, претерпевает существенные изменения, затрагивающие даже кристаллическую решетку слагающего его вещества. Из видимых изменений анода прежде всего можно отметить образование в месте воспринятия разряда точечного повреждения. Если анодом является графитная электрощетка, то повреждение состоит в локальном испарении слагающего ее вещества. Если анодом является медно-графитная электрощетка или коллектор, то повреждение состоит в локальном расплавлении некоторого объема металла. Жидкий металл выплескивается из образовавшейся лунки в межэлектродное пространство, а обнажившееся дно лунки химически взаимодействует со средой. Выплеснувшийся из лунки-анода жидкий металл может достичь катода и отложится на нем прочно связанным слоем (катодное напыление). Таким образом, в результате искрового разряда наряду с обязательным износом анода, в случае если последний изготовлен из металла, одновременно может происходить увеличение размеров катода. При развитии разряда и перехода его в дуговой катод подвергается разрушению.

При перечислении факторов, обусловливающих износ электрощеток, помимо уже рассмотренных механического и электрического упоминался еще и химический фактор. Оценка влияния этого последнего может быть получена с помощью данных, характеризующих рассматриваемую величину при работе электрощеток на контактных кольцах из серебра и золота. Как следует из цифр табл. 5-1, в условиях, когда окисление контактирующих металлических поверхностей не происходит, скорость изнашивания * различным образом поляризованных электрощеток оказывается практически одинаковой.

Произведенное рассмотрение элементарных процессов, участвующих в образовании износов элементов электрического скользящего контакта, показывает, насколько они взаимосвязаны и как неустойчивы условия, определяющие направление их развития. Очевидно, что при подобных обстоятельствах очень трудно рассчитывать на получение однозначных результатов при проведении всех экспериментов. Со значительно большим основанием следует ожидать, что при проведении подобных экспериментов будут получаться наиболее вероятные результаты, но при этом нельзя исключать возможности получения иных результатов. Подобная концепция позволяет согласовать противоречивые данные многочисленных исследователей рассматриваемых явлений, и, хотя вносит некоторую неопределенность, ее физическая сущность представляется правдоподобной. При этом можно также отметить, что подобная концепция не составляет какого-либо исключения в системе существующих взглядов на свойства материи. Вероятностный характер распределения численных значений технических характеристик, описывающих совместную работу элементов электрического скользящего контакта, доказывался автором многократно [Л. 1-18, 3-1].

---

* Скоростью изнашивания электрощеток называется отношение абсолютной величины из износа $\Delta h_{щ}$ ко времени, в течение которого он образовался, ΔT.

Таблица 5-1

Износ электрощеток разной полярности на контактных кольцах из благородных материалов при разной токовой нагрузке [Л. 1-14]

Материал контактного кольца	Ток, А	Путь, пройденный электрощеткой по кольцу, км	Износ электрощеток, 10^{-6} см³/км	
			Щетка „+"	Щетка „—"
Серебро	0	4 500	0,1	0,1
	5	1 100	0,5	0,7
	10	1 250	0,5	0,8
	20	400	0,5	0,5
Золото	0	1 600	0,1	0,1
	5	1 070	0,5	0,5
	10	1 020	0,4	0,4
	20	1 423	0,4	0,3

Примечание. Окружная скорость контактных колец 4,4 м/с, диаметр колец 70 мм.

Исходя из изложенного и анализируя многочисленные экспериментальные данные, можно заключить, что наиболее вероятные соотношения износов различным образом поляризованных электрощеток будут следующими:

Условия работы	Электрощетки „цветных" марок	Электрощетки „черных" марок
При работе на коллекторе	$\Delta h_{щ-} < \Delta h_{щ+}$	$\Delta h_{щ-} > \Delta h_{щ+}$
При работе на контактном кольце из цветного металла	$\Delta h_{щ-} < \Delta h_{щ+}$	$\Delta h_{щ-} > \Delta h_{щ+}$
При работе на контактном кольце из черного металла	—	$\Delta h_{щ-} > \Delta h_{щ+}$

С целью облегчения изучения влияния на износ электрощеток различных факторов в последующем изложении будут использованы главным образом усредненные значения наблюдаемых результатов.

В результате произведенного здесь рассмотрения также установлена прямо пропорциональная зависимость между износом электрощеток и их токовой нагрузкой. Если работа скользящего контакта происходит без искрения, то на основании большинства графиков, показанных на рис. 5-2, можно утверждать, что износ электрощеток является суммой механического и электрического износов:

$$\Delta h_{щ} = \Delta h_{м} + \Delta h_{э}. \quad (5\text{-}3)$$

Если же работа контакта сопровождается искрообразованием, то в последнем выражении появляется третье слагаемое:

$$\Delta h_{щ} = \Delta h_{м} + \Delta h_{э} + \Delta h_{и}. \quad (5\text{-}4)$$

Оценить новое слагаемое можно с помощью рис. 5-4, на котором показано, как изменяется величина износа электрощеток, отнесенная к длине пути пробега по коллектору, при включении в электрическую цепь устройств, способствующих искрообразованию. В качестве таковых в описываемом опыте, проведенном Куртом Биндером [Л. 5-6], использовались индуктивные катушки с различным числом витков w. График на рис. 5-4,*а* получен при некотором начальном числе витков катушки w_0. Последующие графики получены при последовательном удвоении числа этих витков. Несмотря на то что токи при этом в такой же пропорции уменьшались, общий износ электрощеток существенно возрастал.

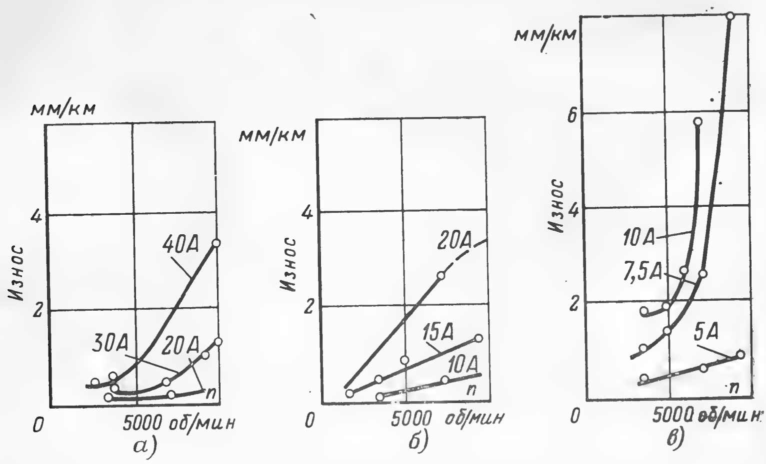


Рис. 5-4. Влияние индуктивности электрической цепи и частоты вращения коллектора на износ электрощеток.

а — w_0; *б* — $2\,w_0$; *в* — $4\,w_0$.

Еще одна иллюстрация влияния искрообразования на износ электрощеток получена в опытах А. Я. Глускина с сотрудниками. Опыты ставились на электрической машине постоянного тока типа ПН-28 и состояли в том, что вначале ее коллектор замыкался накоротко, а затем короткозамыкающие перемычки снимались и машина с электрощетками марки ЭГ-14 работала при различных положениях щеточных траверс и различных режимах подпитки. Подобные мероприятия позволили искусственно расстраивать коммутационный процесс и создавать искрение разной интенсивности. Пропорционально последнему изменялась скорость изнашивания электрощеток (табл. 5-2).

Помимо информации о влиянии индуктивности на износ электрощеток рис. 5-4 содержит сведения о влиянии на эту характеристику еще и угловой скорости коллектора. Последняя вместе с показателями его окружной скорости, общего и местного биения, чистоты поверхности, вибраций и удельного давления на электрощетки образует комплекс механических воздействий. Объединяющим признаком, с помощью которого перечисленное воздействие оказывает влияние

Таблица 5-2

Скорость изнашивания электрощеток марки ЭГ14 на генераторе типа ПН-28 при разной величине тока нагрузки в зависимости от настройки коммутации

Настройка коммутации	Скорость изнашивания, мм/100 ч			
	Ток нагрузки, А			
	5	10	15	20
Коллектор замкнут накоротко; процесс коммутации отсутствует	0,04	0,05	0,06	0,07
Электрощетки находятся на нейтрали; коммутация оптимальная	0,07	0,09	0,12	0,18
Электрощетки сдвинуты по направлению вращения на 1/2 пластины, добавочные полюсы отключены	0,09	0,15	0,21	0,30
Электрощетки на нейтрали; отпитка 25 %	0,12	0,20	0,31	0,44
Электрощетки на нейтрали; добавочные полюсы отключены	0,20	0,36	0,54	0,78

на режим работы электрического скользящего контакта, является перераспределение путей прохождения носителей тока через контактную зону, подробно описанное в гл. 2. Очевидно, что при возрастании скорости, биений, вибраций, шероховатости поверхности и снижения удельных давлений p происходит уменьшение площади непосредственного контакта и возрастает токовая нагрузка на те участки контактной зоны, в которых носители тока выходят в окружающую контакт среду. Очевидно также, что при изменении перечисленных показателей в указанных направлениях происходит изменение характера механического взаимодействия между контактирующими элементами.

В результате общий характер влияния окружной и угловой скорости коллектора, его общего и местного биения, чистоты поверхности и вибраций на скорость изнашивания электрощеток представляет собою плавную линию, описываемую уравнением порядка выше первого. Подобное обстоятельство свидетельствует о том, что по мере возрастания показателей, принятых в качестве аргументов, происходит интенсификация элементарных процессов, вызывающих изменение функций, в данном случае скорости изнашивания электрощеток. Степень этой интенсификации для различных электрощеточных материалов является различной, и ее количественная оценка известна только для ограниченного числа частных случаев. Так, по литературным данным, влияние окружной скорости коллектора v и чистоты его поверхности на скорость изнашивания электрографитированной электрощетки $v_щ$ характеризуется цифрами, приведенными в табл. 5-3.

Представленная здесь степень возрастания $v_щ$ при последовательном увеличении v для различных электрощеточных материалов является различной. Минимальной она оказывается у материалов

Таблица 5-3

Окружная скорость коллектора, м/с	Скорость изнашивания электрощеток $v_щ$, мм/1 000 ч		Окружная скорость коллектора, м/с	Скорость изнашивания электрощеток $v_щ$, мм/1 000 ч	
	на гладком коллекторе	на шероховатом коллекторе		на гладком коллекторе	на шероховатом коллекторе
10	0,6	1,3	30	2,2	5,2
20	1,5	2,9	40	3,8	8,9

групп IIIБ, IVA и IVB, что позволяет применять эти материалы при $v=50 \div 80$ м/с. Наихудшим образом рассматриваемое воздействие проявляется в материалах групп IА, IБ, IВ, IГ, верхний предел допустимой скорости использования которых не превышает 20—30 м/с. При превышении последних значений происходит резкое возрастание скорости изнашивания электрощеток.

Только что рассмотренные показатели окружной скорости коллектора v не следует отождествлять с показателем частоты его вращения n. Хотя оба названных показателя и связаны между собой линейной зависимостью, явления, происходящие в работающих контактах при равных v и разных n, для большого класса машин оказываются существенно различными.

Класс машин, о котором здесь идет речь, включает в себя быстроходные электрические машины, диаметры коллекторов которых менее 100—120 мм. Малогабаритные быстроходные электрические машины в последние десятилетия получили исключительно широкое распространение. Существуют машины, работающие при частоте вращения 10 000—15 000 об/мин, причем тенденция их развития такова, что в будущем можно ожидать появления машин, работающих при $n=50 \div 100$ тыс. об/мин. Следствием описываемого обстоятельства является появление большого количества исследований, посвященных изучению специфики работы скользящего контакта высокооборотных машин малой мощности. Результаты одного из таких исследований, имевших целью оценить влияние на износ электрощеток частоты вращения коллектора n при разной чистоте его поверхности и разных токовых нагрузках, свидетельствуют о том, что интенсивность воздействия частоты вращения коллектора на износ электрощеток возрастает по мере того, как возрастает их токовая нагрузка I. При малых силах тока рассматриваемое воздействие относительно невелико. При повышенных силах тока возрастание частоты вращения оказывается весьма существенным [Л. 5-6]. Все описываемые явления выражены особенно резко при работе электрощеток на коллекторах с шероховатой поверхностью. Очевидно, что здесь проявляется одновременное действие всех компонентов общего износа, перечисленных в формуле (5-4). Факт возрастания $v_щ$ при увеличении n даже при весьма малых значениях окружной скорости коллектора v отмечается всеми исследователями данного вопроса. Вот почему для использования на высокооборотных малогабаритных электрических машинах независимо от окружной скорости их коллекторов следует применять щетки из материалов, предназначенных для работы при больших окружных скоростях.

Изучение влияния на показатель $v_щ$ общего и местного биения коллекторов (т. е. эксцентриситета и перепада уровней соседних

пластин) затруднено тем обстоятельством, что в реальных условиях эксплуатации задавать величины биений невозможно. По указанной причине необходимый экспериментальный материал приходится получать, наблюдая за работой машины в течение некоторого периода времени, измеряя возникающие на ее коллекторе биения и определяя соответствующие им износы электрощеток. Получаемые при этом результаты свидетельствуют о существенном влиянии биения коллекторов на износ. Это влияние является столь значительным, что при эксплуатации высокооборотных машин приводит к механическому повреждению электрощеток.

Скорость изнашивания электроугольных элементов скользящего контакта не остается безразличной по отношению к воздействию вибрационных факторов и в том случае, если эти факторы обусловлены не взаимодействием контактирующих элементов, а вызваны действием внешних причин. Справедливость подобного утверждения иллюстрируется табл. 5-4, показывающей, как изменялась $v_щ$ при установке машины на столе вибростенда, работающего при разных частотах и сообщавшего машине ускорение, равное $5g$.

Характеристики машины: 460 Вт, 27 В, 10 000 об/мин. Используемые щетки марки МГС7. Катастрофическое возрастание значения $v_щ$ при частоте вибрации, равной 280 Гц, авторы опыта объяснили тем, что частота собственных колебаний якоря испытуемой машины составляла 240 Гц, т. е. в условиях описываемого опыта имел место практически резонансный режим [Л. 5-7].

Таблица 5-4

Частота вибраций, Гц	Износ электрощеток, мм, приведенный к 100 ч
0	1,0
260	3,0
280	17,5

Воздействие всех рассмотренных механических факторов на изменение $v_щ$ характерно тем, что они вызывали монотонное возрастание скорости изнашивания электрощеток.

По-другому проявляет себя действие давления на электрощетку p. Как показано на линиях 1 и 2 (рис. 5-5,*а*) для электрощеток, поляризованных различным образом, вид зависимости $v_щ=f(p)$ оказывается различным. U-образный вид линии 1 всегда объясняли соотношением слагаемых в выражении (5-4). В области малых значений p при данной силе тока, проходящего через электрощетки, в контакте возникает усиленное искрообразование. По мере возрастания p слагаемое $\Delta h_и$ уменьшается, достигая даже нулевого значения. Это состояние и объясняет появление минимума на рассматриваемой кривой. Дальнейший рост значений p вызывает пропорциональное возрастание слагаемого $\Delta h_м$. Конкретные значения p, с помощью которых можно было бы установить границы каждой из зон, определяются прежде всего типом электрических машин. Так, на основании целой серии экспериментов, проведенных на мощных электрических машинах, эксплуатируемых в генераторном и двигательном режимах на металлургических заводах, автору удалось показать, что правая восходящая ветвь кривой $v_щ=f(p)$ соответствует значениям $p=120 \div 270$ гПа (кг/см²). Для электрощеток тех же классов, используемых на малогабаритных генераторах автотракторной серии при $n=3\,000$ об/мин, аналогичная область изменения $v_щ$ возникает при $p \geqslant 1\,500 \div 1\,600$ гПа (гс/см²). При отсутствии тока $v_щ$ с повышением p линейно растет. Сопоставление линий 2 и 3

рис. 5-5,*а* позволяет выявить роль тока в изучаемом процессе. Дать обоснованное объяснение отмечаемому явлению пока трудно, поскольку приводимые здесь данные о полярном износе электрощеток отличаются от наиболее вероятных. Для того чтобы внести ясность в этот вопрос, необходимы дальнейшие эксперименты. Подобные эксперименты нужны также и для того, чтобы объяснить показанную на правой части рис. 5-5 зависимость между износом электрощеток, поляризованных различным образом, и температурой поверх-

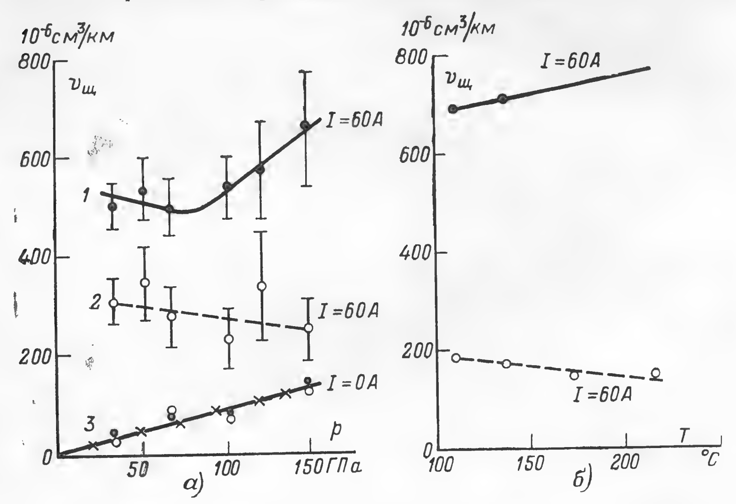


Рис. 5-5. Влияние удельного давления p и температуры поверхности скольжения коллектора T на скорость изнашивания графитных электрощеток [Л. 5-8].

——— — анодно-поляризованные электрощетки; — — — — катодно-поляризованные электрощетки; —×—×—×—× — для всех электрощеток без нагрузки током.

ности скольжения коллектора. К только что рассмотренному влиянию механических факторов на скорость изнашивания электрощеток весьма близко примыкает вопрос о влиянии на нее способа установки электроугольных изделий относительно рабочей поверхности коллектора, т. е. их фасона. Конкурирующими здесь являются радиальные и реактивные фасоны электрощеток, область применения каждого из которых в течение последних десятилетий служила предметом многочисленных исследований. Можно считать установленным, что крупные электрические машины должны оборудоваться радиальными электрощетками. Областью использования реактивных электрощеток являются малогабаритные электрические машины, работающие при большом числе оборотов. Реализация изложенной рекомендации позволяет нормализовать механические параметры режима работы скользящего контакта и снизить скорость изнашивания образующих его элементов.

Изложенные рекомендации по рассматриваемому вопросу основываются на данных практики отечественного электромашиностроения. Английские источники свидетельствуют о том, что в Англии на крупных нереверсивных двигателях и генераторах преимущественное распространение получили радиальные щеткодержатели, в которые устанавливаются прямоугольные электрощетки со скосом верхней плоскости или без такового. Радиальные электрощетки находят себе применение и на крупных реверсируемых машинах, на которых можно встретить также и реактивные электрощетки. Последние устанавливаются по одной из двух схем: острый угол контактной поверхности ориентирован против направления вращения

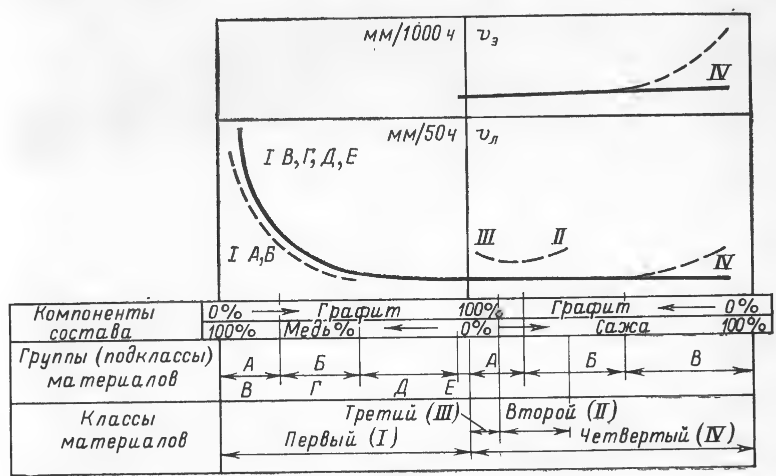


Рис. 5-6. Общая закономерность изменения скорости изнашивания электрощеток в зависимости от состава материала, из которого они изготовлены.

$v_л$ — скорость изнашивания электрощеток по данным лабораторных испытаний на короткозамкнутом коллекторе; $v_э$ — то же по данным эксплуатации.

коллектора (собственно реактивная электрощетка) либо совпадает с этим направлением (волочащаяся электрощетка). В первом случае углы наклона электрощетки лежат в пределах 30—35°, а во втором — 5—15°.

Применение V-образных тандем щеткодержателей с равными и неравными углами скоса расположенных в них реактивных электрощеток, по свидетельству английских авторов, во всех странах прекращено [Л. 5-9]. Отечественная практика подтверждает целесообразность подобного мероприятия для крупных электрических машин.

Общая закономерность изменения скорости изнашивания электрощеток в зависимости от их состава при работе на медных коллекторах показана на рис. 5-6. В нижней части рис. 5-6 приведены обобщенные результаты испытаний электрощеток на короткозамкнутых коллекторах, осуществлявшихся в лабораториях электроугольных заводов в течение двадцатилетнего периода действия ГОСТ 2332-43. В верхней части рис. 5-6 показаны аналогичные результаты, полученные при массовых испытаниях электрощеток на

крупных электрических машинах на предприятиях металлургической промышленности [Л. 1-4]. Из рис. 5-6 следует (учитывая пунктирные участки кривых), что рассматриваемая характеристика не является однозначной функцией состава электрощеточного материала. Для композиций, расположенных в правой части оси абсцисс, т. е. для композиций, содержащих значительное количество сажи при данном составе, можно получить материалы с существенно различной износоустойчивостью. Исследованиями установлено, что отмечаемое обстоятельство связано со структурой материала. Оказалось, что при данном соотношении компонент состава готовая композиция может иметь различную структуру, одна из которых (пористая) обладает низкой износоустойчивостью, а другая (мозаичная) высокой [Л. 1-4, 1-11].

Большой практический интерес представляет изучение характеристик износа электрощеток при эксплуатации скользящего контакта в верхних слоях атмосферы. Общеизвестно, что при работе коллекторных электрических машин на высотах более 7—8 тыс. м над уровнем моря обычные электрощетки форсированно изнашиваются и работа машин в этих условиях оказывается невозможной. Подобное явление связано с изменением состояния атмоферы при подъеме на высоту. Как было показано в табл. 2-1, до высоты порядка 30 км объемный состав воздуха остается практически постоянным, но при этом существенно снижаются его давление и температура. Снижение температуры воздуха приводит к уменьшению абсолютного количества содержащихся в нем водяных паров. С повышением высоты парциальное давление кислорода снижается относительно быстрее, чем давление воздуха, и при этом интенсифицируется действие ультрафиолетовых лучей, вызывающих образование некоторых количеств озона и окислов азота. Описанные процессы и явления нарушают условия, необходимые для образования контактной политуры. Отсутствие таковой приводит к усилению молекулярного сцепления между поверхностями контактирующих элементов. В результате интенсивно развиваются процессы фрикционного износа, механизм действия которых был описан выше, в начале данной главы.

Систематическое исследование описанного явления было начато в годы развития реактивной высотной авиации. Поставленные тогда эксперименты позволили воспроизвести в лабораторных условиях процесс высотного износа и показать, как этот процесс связан с содержанием в атмосфере, окружающей контакт, паров влаги, кислорода и других компонент (рис. 5-7,*а, б, в*). Описанные эксперименты, дополненные исследованиями последующих лет (рис. 5-7,*г*), позволили выявить общие закономерности, определяющие влияние состояния окружающей среды на характеристики износа серийных, специальным образом не обработанных электрощеток. Выявление этих закономерностей позволило установить, что для нормального функционирования электрического скользящего контакта необходимо обеспечить условия образования и поддержания в должном состоянии коллекторной пленки. Эти условия должны создаваться независимо от того, в какой атмосфере работает скользящий контакт: воздушной, окислительной, восстановительной или нейтральной.

Создание необходимых условий может осуществляться следующими способами: путем введения в атмосферу требуемых компонент, путем введения в материал электрощеток специальных пленкообразующих веществ; путем подбора соответствующих материалов для коллекторов.

Первый способ широко используется в наземных электротехнических установках. Обычно его реализуют путем обогащения воздуха, охлаждающего машины водяным паром; при этом не следует превышать целесообразные пределы содержания названной компоненты в атмосфере. К чему приводит нарушение подобной рекомендации, показано на рис. 5-7,*г*. Двойственность влияния влаги на из-

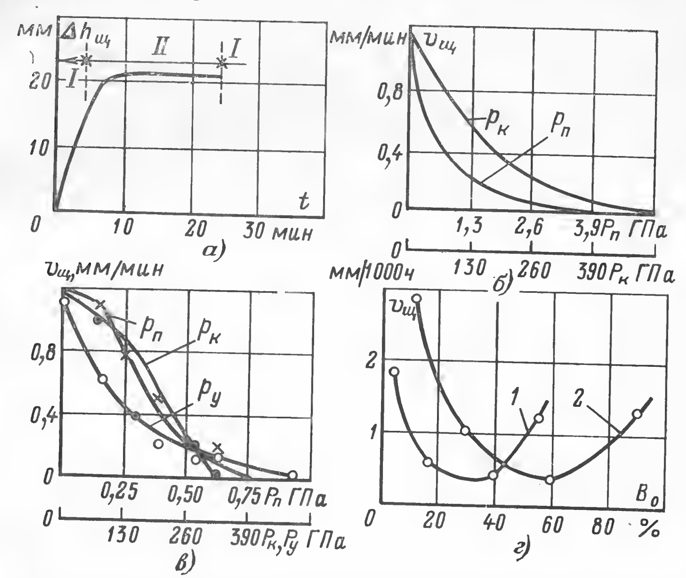


Рис. 5-7. Изменение скорости изнашивания электрощеток в зависимости от состояния внешней среды.

а — износ электрощеток при работе их в сухой (*I*) и увлажненной (*II*) атмосфере [Л. 5-10]; *б* — изменение скорости изнашивания электрощеток при работе их в атмосфере воздуха при разных значениях парциального давления содержащихся в ней водяных паров $p_п$ и кислорода $p_к$ [Л. 5-11]; *в* — изменение скорости изнашивания электрощеток при работе их в атмосфере азота при разных значениях парциального давления содержащихся в ней водяных паров $p_п$, кислорода $p_к$ и двуокиси углерода $p_у$ [Л. 5-10]; *г* — изменение скорости изнашивания электрощеток при работе их в воздушной атмосфере (*2*) и атмосфере водорода (*1*) при разной относительной влажности B_0 [Л. 5-12].

нос электрощеток объяснена в работе [Л. 5-12], авторы которой считают, что при умеренном ее содержании она способствует образованию политуры и, являясь кислородофобным агентом, препятствует проникновению кислорода в контактную зону, тем самым задерживая процесс окисления и разрушения контактных элементов. При значительном содержании паров влаги они оседают на контактную поверхность и, изолируя одну часть площадок непосредственного контакта, вызывают повышенную концентрацию тока в другой их части. Последнее и вызывает повышенный износ электрощеток.

Второй из упомянутых способов создания необходимых условий для работы электрощеток находит себе применение в самолетном

электрооборудовании. Его реализуют путем подбора материалов для металлсодержащих электрощеток и введением надлежащим образом подобранных пропитывающих веществ в электрощетки из «черных» материалов. Облагораживание цветных электрощеток осуществляется добавлением в их состав олова или свинца или одновременно обоих металлов. Присутствие в составе материала электрощеток легкоплавких компонентов приводит к тому, что при работе, в процессе скольжения, эти компоненты расплавляются или переходят в состояние, близкое к плавлению. В результате олово и свинец проникают в поверхностный слой коллектора, где совместно с графитом создают необходимые смазывающие свойства между взаимодействующими поверхностями. Кроме того, олово частично реагирует с медью коллектора, сглаживая его поверхность и образуя на ней тонкую защитную пленку фазы $\eta - Cu_6Sn_2$ и фазы $\varepsilon - Cu_3Sn$. Наличие такой пленки также существенно улучшает процесс скольжения контактирующих элементов.

Повышение износоустойчивости электрощеток путем введения в них пропитывающих веществ является одним из наиболее перспективных направлений совершенствования этого элемента скользящего контакта. Об эффективности этого направления можно судить по данным табл. 5-5. Изыскиваются новые, еще более эффективные пропитывающие вещества и разрабатываются методы их введения в электрощетки.

Снижение износа электрощеток за счет подбора соответствующих материалов для коллекторов пока широкого распространения не получило. В литературе имеются сообщения о том, что отсутствие влаги не вызывает форсированного износа электрощеток при работе их на хромовой, родиевой и латунной поверхностях [Л. 5-10]. В патенте США № 2739256.20.03.56 рекомендуется изготавливать коллекторы авиационных электромашин из медно-никелевого сплава, состав которого определяется условиями эксплуатации. Так, для машин, работающих на высоте около 18 км, количество никеля в сплаве должно составлять примерно 30% (остальное медь). При большей высоте количество никеля повышается до 55—60%.

Интересно предложение о снижении износа электрощеток в высотных условиях путем изготовления коллекторов из графита. Проверка этого предложения производилась путем испытания электрощеток в термобарокамере при —50 °С в условиях, имитирующих высоты 1, 5, 10, 15, 20 км над уровнем моря, по 2 ч на каждой высоте и 4 ч при высоте 25 км и плотности тока 25 А/см². Испытаниям подвергались электрощетки марки ЭГ74, последовательно устанавливаемые на коллекторы, изготовленные из этого же графитного материала и из меди марки М1. В результате испытаний было установлено, что в первом случае износ электрощеток составил 0,01 мм, а во втором 3,0 мм [Л. 3-8]. Аналогичные результаты получены при испытании электрощеток в вакууме (10^{-5}—10^{-6} гПа). В данном случае опыты велись с электрощетками марок ЭГ2а и ЭГ4, работавшими, подобно предыдущим, на коллекторах из тех же материалов, что и сами электрощетки, а затем на коллекторах из меди М1. Полученный результат свидетельствует о том, что и в данном случае при использовании графитовых коллекторов характерного высотного износа электрощеток не наблюдалось. Подобный результат объясняется тем, что благодаря повышенной сорбционной емкости графитовых материалов содержащихся в массе коллекторов количеств кислорода и влаги при достигнутой глубине ваку-

Таблица 5-5

Изменение скорости изнашивания электрощеток при введении в них различных пропитывающих веществ

Марка электрощеточного материала	Пропитывающее вещество	Условия проведения испытаний	Объект испытания	Средняя скорость изнашивания, мм/100 ч	Источник информации
ЭГ74	Без пропитки Сернистый молибден Углекислый литий	Наземные	Генератор типа ГСР-9000	12,0 2,4 1,0	[Л. 4-7]
ЭГ74	Без пропитки Углекислый литий	То же	То же	11,3 1,0	[Л. 4-7]
ЭГ74	Без пропитки Каменноугольный пек	То же	Короткозамкнутый коллектор	2,0 0,6	[Л. 4-7]
ЭГ74	Без пропитки Каменноугольный пек Фтористый барий	То же	Генератор типа ГСР-9000	4,5 { 2,3 { 1,9	[Л. 4-7]
Угольная	Без пропитки Смола „мастикс"	То же	—	0,20—0,30 0,04—0,08	[Л. 4-10]
Электрографитированная	Без пропитки Кумароновая смола	То же	—	2,42 0,88	[Л. 5-13]
ЭГ14	Без пропитки Бакелит	То же	Тяговые двигатели в условиях эксплуатации	0,20 0,10	Данные автора
ЭГ74	Металлическое мыло Углекислый литий	То же	Генератор типа ГП-16-3000 в условиях эксплуатации	0,45 0,22	То же

Продолжение табл. 5-5

Марка электрощеточного материала	Пропитывающее вещество	Условия проведения испытаний	Объект испытания	Средняя скорость изнашивания, мм/100 ч	Источник информации
ЭГ74	Металлическое мыло Углекислый литий	Наземные	Двигатель типа МП-6800-340 в условиях эксплуатации	0,42 0,32	Данные автора
ЭГ74	Без пропитки Эпоксидная смола Пек	То же	Генератор типа ГП-3000-375 в эксплуатации	0,17 0,15 0,12	То же
Графитная	Без пропитки Политетрафторэтилен	На высоте 18 000 м	Контактные кольца	381 12,7—17,8	[Л. 4-8]
ЭГ74	Без пропитки Ленолеат кобальта	Наземные	Двигатель типа МП-11000-65 в условиях эксплуатации на блюминге „1300“	0,15 0,08	[Л. 5-19]
ЭГ74	Без пропитки Ленолеат кобальта	То же	Генератор типа ПС-5200-375 в условиях эксплуатации на блюминге „1150“	1,24 0,67	То же
ЭГ74	Без пропитки Ленолеат кобальта	То же	Генератор типа МСГ-12 в условиях эксплуатации на стане „800“	0,6 0,4	То же

Продолжение табл 5-5.

Марка электрощеточного материала	Пропитывающее вещество	Условия проведения испытаний	Объект испытания	Средняя скорость изнашивания, мм/100 ч	Источник информации
Медно-графитная	Без пропитки Политетрафторэтилен	На высоте 18 000 м	Контактные кольца	254—762 7,6—12,7	[Л. 4-8]
ЭГ74	Без пропитки Сернистый молибден	То же	То же	160 2,0	[Л. 4-7]
Электрографитированная	Без пропитки Парафин Хлорированный парафин	То же	—	575 0,43 0,12	[Л. 5-14]
Угольная	Без пропитки Йодистый кадмий	На высоте 9 000 м	Авиационный генератор	178 1,27	[Л. 5-15]
ЭГ74	Без пропитки Суспензия фторопласта 4Д	Наземные	Генератор типа П-71	0,91 0,16	Данные промышленности
ЭГ74	Без пропитки Хлористый калий Азотнокислый магний	То же	Двигатель типа ПН-205	0,17 0,12 0,09	То же
ЭГ74	Без пропитки Фтористый кадмий	То же	Преобразователь типа АПП8РТ	0,46 0,36	То же

ума оказалось достаточным для предотвращения интенсивного износа.

Только что рассмотренные зависимости между износом электрощеток и состоянием среды касались в основном таких параметров, как содержание влаги и кислорода. Оценка степени влияния на рассматриваемую характеристику некоторых других показателей ее состава иллюстрируется цифрами, приведенными в табл. 5-6. Содержащиеся здесь данные получены в результате испытания металлсодержащих электрощеток на машине, помещенной в камеру, последовательно заполнявшуюся различными газами.

Таблица 5-6

Изменение скорости изнашивания металлсодержащей щетки при работе электрической машины в различных средах

Продолжительность периода работы машины, ч	Окружающая среда	Средняя скорость изнашивания электрощеток за время работы машины в данной среде, мм/100 ч	
		Анодно-поляризованная щетка	Катодно-поляризованная щетка
130	Воздух	0,30	0,30
420	Водород	0,02	≈0
150	Азот	0,03	0
210	Водород	0,02	0,03
130	Кислород	3,30	0,62
145	Водород	0,06	≈0
150	Углекислый газ	0,01	≈0

Из рассмотрения табл. 5-6 следует, что восстановительная среда водорода существенно снижает износ по сравнению с воздушной средой, а окислительная среда еще более существенно его повышает. Среда азота N_2 и углекислого газа CO_2 действует подобно водороду. Этот результат в части, касающейся влияния водорода, был опровергнут в публикации [Л. 3-12], где сообщалось, что замена воздуха водородом приводит к возрастанию скорости изнашивания электроугольных изделий. Наконец существует и такая точка зрения, согласно которой скорость изнашивания электрощеток, работающих без искрения, как на воздухе, так и в водороде остается практически одинаковой. Описанные противоречия явились следствием недостаточно полного учета влияния содержания влаги в средах, в которых проводились эксперименты. Как показано на рис. 5-7,*г*, варьирование содержанием влаги в сопоставляемых средах позволяет получить любой из трех описанных результатов.

Помимо рассмотренного на износ электрощеток влияют также и другие химические и механические компоненты состава среды, окружающей контакт. В [Л. 3-12] описан случай существенного ухудшения работы скользящего контакта и возрастания скорости изнашивания электрощеток только потому, что в составе атмосферы оказалось незначительное количество сероводорода: на 1 млн. частей атмосферы приходилось 210 000 частей кислорода и 0,03 части сероводорода. Там же описан случай ухудшения работы скользящего контакта из-за того, что в составе окружающей атмосферы на 1 млн. частей воздуха приходилось 10 частей (т. е. 10^{-3}%) кремнийсодер-

жащих веществ. Более подробные сведения о форсированном износе электрощеток, используемых в среде, содержащей кремнийорганику, так же как и сведения о механике описываемого явления, можно найти в [Л. 3-13]. Хлор приводит к просветлению коллекторов. Соединяясь с влагой, он образует соляную кислоту, которая очищает политуру. На контактной поверхности электрощетки-катода отлагается медь, и на коллекторе образуется значительное количество грязи, легко удаляемой тряпкой. Аналогичным образом проявляет себя и аммиак [Л. 2-3].

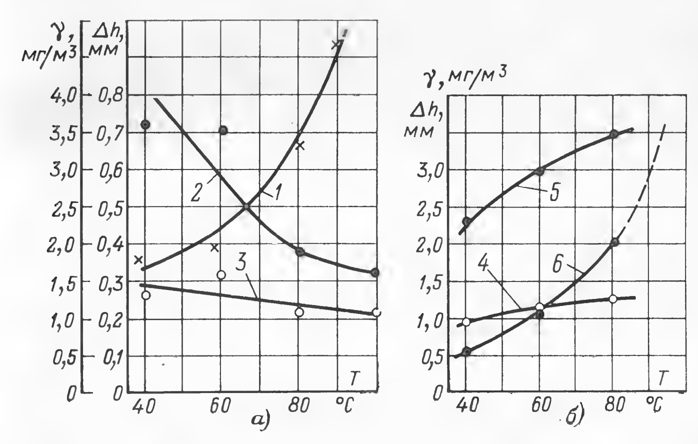


Рис. 5-8. Зависимость между температурой нагрева масла T, концентрацией паров масла $\gamma_м$ и износом электрощеток Δh [Л. 3-13].

а — масло марки МВП; *б* — масло марки ВПС; *1*, *4* — концентрация паров масла в атмосфере; *2* и *5* — электрощетки марки 73; *3* и *6* — электрощетки марки ЭГ74К.

Присутствие в атмосфере паров масел влияет на скорость изнашивания электрощеток по-разному. Характер этого влияния определяется сортом испаряемого вещества. Опыты, проведенные автором и его сотрудниками, показали, что при концентрации паров масел в воздухе, достигавшей 4 мг/м³, в одном случае износ электрощеток возрастал, а в другом снижался (рис. 5-8). Подобное явление объясняется тем, что вызывавшее форсирование износа масло марки ВМС представляет собой смесь минерального масла марки МВТ с полиэтилсилоксановой жидкостью. Кремнийорганические компоненты последней и ответственны за повышение значений $v_щ$.

Явление снижения износа электрощеток в атмосфере, содержащей пары минерального масла, находит свое дальнейшее развитие при использовании скользящего контакта в среде жидкого диэлектрика. Так, по данным [Л. 3-16] значения $v_щ$ при работе металлсодержащих электрощеток в трансформаторном масле были следующими:

Щетки марки МГ . . . . . $v_щ=0,026 \div 0,033$ мм/50 ч
Щетки марки МГСО . . . $v_щ=0,10 \div 0,40$ мм/50 ч

Номинальные значения рассматриваемой характеристики при работе контактов в воздухе соответственно равны 0,51 и 0,38 мм/50 ч, а с учетом возможных рассеяний по «двухсигмовому пределу» достигают величин 1,15 и 1,52 мм/50 ч [Л. 1-4, 3-1]. Полярные различия в износе погруженных металлсодержащих электрощеток такие же, как и у работающих в атмосфере воздуха.

Опыты с электрощетками, изготовленными из баббита, показали, что скорость изнашивания анодно-поляризованной электрощетки составила $v_{щ+}=0{,}061$ мм/50 ч, а щетки противоположной полярности $v_{щ-}=0{,}01$ мм/50 ч [Л. 3-16]. Таким образом, и здесь оказывается справедливым неравенство $v_{щ-}<v_{щ+}$, о котором упоминалось ранее.

Описываемый эффект снижения скорости изнашивания электрощеток, работающих в жидком диэлектрике, проявляет себя только в том случае, когда в скользящем контакте отсутствует искрение. При возникновении такового величина $v_щ$ существенно возрастает. По данным [Л. 3-18] кратность такого возрастания составляет 1—2 порядка.

При рассмотрении износа электрощеток, эксплуатируемых в условиях высоты, отмечалось, что улучшить эту характеристику можно за счет выбора соответствующего материала для коллекторов. Материал последних оказывает определенное влияние на износ электроугольных изделий, работающих и в наземных условиях. В табл. 5-7 показано, как изменяется скорость изнашивания элек-

Таблица 5-7

Изменение скорости изнашивания электрощеток в зависимости от материала контактных колец

А. В среде азота [Л. 5-10]

Материал контактных колец	Относительная скорость изнашивания электрощеток, мм/1 000 ч	Твердость материала кольца	
		по Бринеллю, 10^7 Па (кгс/мм²)	по десятибалльной шкале МООСА
Серебро	1,96	20—25	2,7
Золото	1,64	19—25	2,5
Медь	1,00	120	3,0
Никель	0,19	111—300	3,8
Бронза	0,00	60—120	—

Б. В среде водорода [Л. 5-12]

Материал контактных колец	Скорость изнашивания электрощеток марки ЭГ74АФ, мм/1 000 ч		Твердость материала кольца по Бринеллю, 10^7 Па (кгс/мм²)
	анодно-поляризованной	катодно-поляризованной	
Медь кадмиевая	0,86	1,9	95—115
Медь магниевая	0,64	0,9	135
Медь хромистая	0,79	1,3	130—150
Бронза Бр.АЖ9-4	0,71	1,2	—
Сталь	0,86	3,2	180—220

трощеток при работе их на контактных кольцах из различных металлов и в различных средах. Оказывается, что при работе в среде нейтрального азота, т. е. в условиях, исключающих возможность образования политуры на поверхностях скольжения, большая твердость материала вызывает уменьшение относительной скорости изнашивания электрощеток (см. также табл. 5-1). Исключение из отмеченного правила составила медь.

При работе скользящего контакта в восстановительной среде водорода отмеченное правило не сохраняется. В данном случае анодно-поляризованные электрощетки практически не реагируют на природу материала контактного кольца, а износ катодно-поляризованных электрощеток можно полагать увеличивающимся с возрастанием твердости материала, из которого оно изготовлено. Последнее замечание делается на основании сопоставления первой и последней строк раздела Б табл. 5-7 и плохо подтверждается промежуточными данными.

В последние годы появились предложения об изготовлении пластин-коллекторов и контактных колец из металлокерамических композиций методами, аналогичными тем, которые используются при производстве электрощеточных материалов [Л. 5-16, 5-17]. В связи с указанным возникает интерес к изучению влияния, которое оказывает на износ электрощеток замена компактных (литых) материалов коллекторов и колец металлокерамическими. Заимствованные из [Л. 5-17] данные о результатах сравнительных испытаний электрощеток нескольких марок на контактных поверхностях из металлокерамических и литых материалов приведены в табл. 5-7а.

Описанные здесь данные получены при испытаниях, выполненных в обычной воздушной среде. Все они свидетельствуют о том, что наименьшая скорость изнашивания как «черных», так и «цветных» щеток наблюдается при работе их на металлокерамических коллекторах из чистой меди. Далее по степени возрастания вызываемой ими скорости изнашивания электрощеток следуют коллекторы и кольца из металлокерамической композиции медь — кадмий, из литой (компактной) меди и, наконец, коллекторы из металлокерамических композиций, содержащих железо.

Наряду с рассмотрением износа электрощеток при конструировании скользящего контакта необходимо учитывать, что процессу постепенного изменения состояния и размеров подвержены также рабочие поверхности коллекторов и контактных колец. В самом общем случае износ этих элементов скользящего контакта можно полагать состоящим из тех же компонент, которые определяли износ электрощеток:

$$\Delta h_к=\Delta h_м+\Delta h_э+\Delta h_и.$$

Однако в связи с тем, что время взаимодействия каждого данного участка поверхности скольжения коллекторов и контактных колец с электрощеткой относительно невелико, скорости их изнашивания оказываются незначительными. Износ коллектора (по радиусу) мощной электрической машины за 1 000 ч ее работы составляет примерно 0,08—0,12 мм. На тяговых двигателях современных скоростных электровозов и тепловозов износ коллекторов составляет 0,07—0,08 мм за 100 тыс. км пробега локомотива. Приведенные цифры относятся к случаям удовлетворительной работы скользящего контакта при искрении, не превышающем $1^1/_4$—$1^1/_2$ балла по ГОСТ 183-65. При нарушении указанных условий в случае проник-

6*

Таблица 5-7а

Условия проведения испытаний	Материал коллектора (контактного кольца)	Скорость изнашивания электрощеток
Стендовые испытания электрощеток марки МГСА на коллекторах автомобильных стартеров типа СТ-15, в течение которых на стартерах было произведено 50 тыс. включений	Металлокерамические композиции следующих составов: Cu—100% Cu—75%, Fe—25% Cu—50%, Fe—49%, C—1% Компактная медь марки М1	 3,0—0,5 мм/50 000 включений 4,9—8,5 мм/50 000 „ 4,6—7,7 мм/50 000 „ 4,5—5,0 мм/50 000 „
Сравнительные испытания электрощеток марки ЭГ2А на коллекторах двигателей типа ДК-653	Металлокерамическая композиция Cu—100% Компактная медь марки М1	0,65 г/1 000 ч испытаний 0,87 г/1 000 ч „
Сравнительные испытания щеток марки М1 на контактных кольцах экспериментального стенда	Металлокерамическая композиция Cu—100% Компактная медь с присадкой кадмия (1%) Компактная латунь марки ЛС-59-1	0,19—0,29 г/1 000 ч испытаний 0,19—0,35 г/1 000 ч „ 0,21—1,0 г/1 000 ч „

повения в зону контакта пыли или химических активных веществ, повреждающих политуру, скорость изнашивания коллекторов существенно возрастает. К таким же последствиям приводит возникновение искрения в скользящем контакте погружных электрических машин [Л. 3-16, 3-18].

Процесс износа поверхностей скольжения контактных колец имеет свои особенности, так как направление тока в каждом из них является различным. На основании изложенного при рассмотрении износов электрощеток различной полярности можно объяснить, почему катодно-поляризованое кольцо, работающее с электрощеткой—анодом, имеет на себе хорошо развитый слой углеродистого материала, гладкую поверхность скольжения и малый износ. Поверхность анодно-поляризованного кольца, работающего с электрощеткой-катодом, шероховата и изнашивается более интенсивно. Практическим следствием описываемого влияния полярных свойств является наблюдаемый в практике эксплуатации электрических машин неравномерный износ колец разной полярности. Для выравнивания этого износа рекомендуется периодически, 1—2 раза в год, менять направление проходящего через контакт тока. После осуществления подобной рекомендации нагрузка в токовой цепи в течение нескольких часов не должна превышать 40—50% номинальной. В этом случае создаются более благоприятные условия для формирования новых политур на контактных кольцах и исключается возможность появления искрения в контакте.

При выполнении коллектора и контактных колец из металлокерамических композиций износы электрощеток снижаются. Естественно при этом выяснить, как изменится в новой контактной паре износ коллекторов и контактных колец. В [Л. 5-17] описан ряд опытов, показавших, что при замене в коллекторах пластин из компактной (литой) меди марки М1 металлокерамическими пластинами износостойкость последних оказывается более высокой. Так, например, по наблюдениям за коллекторами автомобильных стартеров типа СТ15 после 50 тыс. включений было установлено, что диаметры металлокерамических коллекторов уменьшались на 0,1 мм, а обычных из меди марки М1 на 0,5 мм. Металлокерамический коллектор возбудителя, проработавший со щетками марки ЭГ2А 12 000 ч, уменьшил свой диаметр на 0,34 мм, а медный коллектор на 1,04 мм. В других источниках столь оптимистический вывод о преимуществах металлокерамических коллекторов подтверждения не получил. В [Л. 5-16] сообщалось, что при работе в течение 1 030 ч сварочных преобразователей типа ПС-500, оборудованных электрощетками марки М1, уменьшение диаметра контактных колец было следующим:

Медь металлокерамическая	0,02—0,06 мм
Медь компактная, кадмиевая	0,02—0,04 мм
Латунь компактная	0,03—0,036 мм

Для более полного выяснения рассматриваемого вопроса необходимы дальнейшие эксперименты.

Произведенное изучение постепенного изменения размеров и состояния взаимодействующих элементов электрического скользящего контакта не касалось вопроса об образующихся при этом продуктах износа. Между тем при разработке систем охлаждения электрических машин возникают различные вопросы, для решения которых необходимы сведения о фракционном составе этих продуктов и об-

щем их количестве за определенное время. Некоторые сведения об этом можно найти в литературе, сообщающей о том, что конечный зазор между электрощеткой и коллектором заполнен зернами, форма и размеры которых определяются их происхождением и видом электрощеточного материала. Продукты, образовавшиеся в результате механического износа электрографитированных щеток, имеют форму цилиндров диаметром примерно 1,5 мкм и длиной до 20 мкм.

Продукты электрического износа имеют шарообразную форму диаметром от одного до нескольких микрометров. При пористости электрощеточного материала 25% и при скорости изнашивания электрощетки 2,4 мм/1 000 ч эксплуатации с одного квадратного сантиметра ее контактной поверхности ежесекундно отделяется $0{,}5\times\times10^{-4}$ мм³ материала. При шарообразной форме зерна с диаметром 5 мкм в течение секунды в зоне контакта образуется 765 зерен. Приведенные размеры продуктов износа при проверке в лабораториях фирмы «Морганайт» воспроизведены не были [Л. 3-15]. Этот факт может быть объяснен тем, что в последнем случае изнашиванию подвергались изделия из других материалов. В литературе можно также встретить сообщение о фракционном составе продуктов износа щеток, собранных с работающих электрических машин. Этот анализ показал, что около 90% зерен имеют размеры от 100 до 15 мкм, а остальные от 0,1 до 3 мкм, причем продукты износа оказываются наэлектризованными.

Характеристики продуктов износа электрографитированных щеток, образовавшихся при работе на стендах, помещенных в среде азота и воздуха, описаны в [Л. 5-18]. Размеры образовавшихся частиц определялись по снимкам, сделанным с помощью электронного микроскопа. Средний размер частиц, образовавшихся при износе в аргоне, составил примерно 0,1 мкм. При износе в воздухе размер частиц возрос примерно до 2 мкм. В первом случае частицы имели вид аморфного материала, во втором — кристаллических обломков. Удельная поверхность продуктов износа для исследовавшихся материалов класса ЭГ (материалы марок SA25, SA35, SA45, SA50) оказалась практически одинаковой и для пыли, полученной в аргоне, составила примерно 400 м²/г. Рентгенограммы исходного материала и полученных в аргонс продуктов диспергирования оказались близкими. Порошки износа содержат значительное количество кислорода. Простое измельчение исходного материала не может имитировать образование продуктов износа. Исключение составляет только сажа, для которой характеристики измельченных и изношенных частиц собранных с работающей машины, близки между собой.

При расчете фильтров, устанавливаемых в системах охлаждения закрытых электрических машин, помимо знания фракционного состава продуктов изнашивания электрощеток необходимо располагать данными о количестве этих продуктов. Объем электрощеточной пыли, образуемой изнашивающимися электрощетками за 1 ч работы машины, может быть вычислен с помощью формулы

$$V_{п}=0{,}2\,\frac{P}{jU\eta}\,\bar{V}_{щ}\,\frac{\gamma_{у}}{\gamma_{н}},\ \text{л/ч}, \qquad (5\text{-}5)$$

где P — мощность машины, кВт; U — напряжение, В; η — к. п. д.; j — расчетная плотность тока в электрощетке, А/см²; $\bar{V}_{щ}$ — средняя скорость изнашивания электрощеток, мм/1 000 ч; $\gamma_{у}$ — плотность

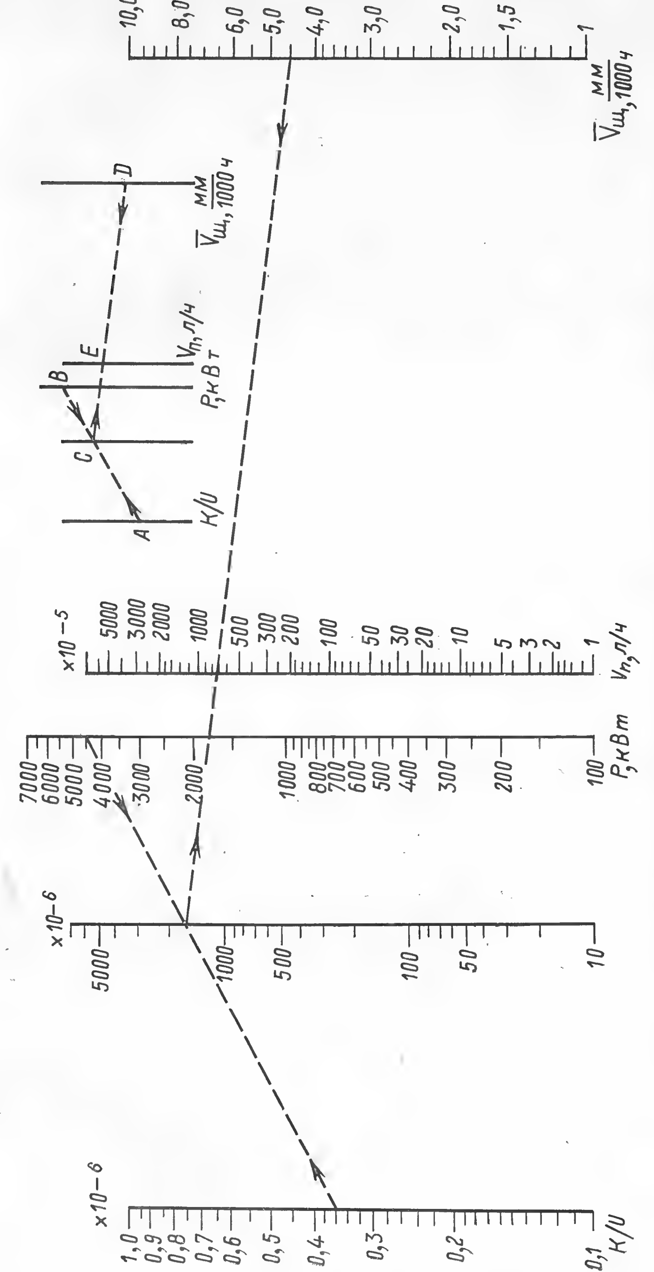


Рис. 5-9. Номограмма для определения количества продуктов износа электрощеток.

электрощеточного материала, г/см³; $\gamma_н$ — насыпная масса продуктов износа электрощеток, г/л.

Расчеты по предложенной формуле значительно упрощаются, если обозначить

$$0,2\frac{\gamma_у}{j\eta\gamma_н}=K.$$

Тогда (5-5) примет вид:

$$V_п=\frac{K}{U}P\overline{V}_щ,\ л/ч. \qquad (5\text{-}6)$$

Воспользовавшись табл. 5-8, в которой содержатся вычисленные для ряда марок электрощеточных материалов и машин разных напряжений значения члена K/U, определение искомой величины $V_п$ окажется возможным произвести с помощью номограммы, показанной на рис. 5-9. В качестве примера на этой номограмме произведено определение объема продуктов износа электрощеток марки ЭГ74, работающих на машине мощностью $P=4\,500$ кВт, при напряжении 400 В ($K/U=0{,}36\cdot10^{-6}$), со средней скоростью изнашивания $\overline{V}_щ=4{,}50$ мм/1 000 ч. В результате соответствующих построений на номограмме получено $V_п=0{,}007$ л/ч.

Таблица 5-8

Значение члена K/U для электрощеток разных марок

Напряжение машин, В	Марки электрощеток		
	ЭГ2А, ЭГ71, ЭГ20	ЭГ4, ЭГ14, 611М	ЭГ74
240	$0{,}82\cdot10^{-6}$	$0{,}76\cdot10^{-6}$	$0{,}69\cdot10^{-6}$
320	$0{,}62\cdot10^{-6}$	$0{,}57\cdot10^{-6}$	$0{,}52\cdot10^{-6}$
460	$0{,}43\cdot10^{-6}$	$0{,}39\cdot10^{-6}$	$0{,}36\cdot10^{-6}$
750	$0{,}26\cdot10^{-6}$	$0{,}24\cdot10^{-6}$	$0{,}22\cdot10^{-6}$
860	$0{,}23\cdot10^{-6}$	$0{,}21\cdot10^{-6}$	$0{,}19\cdot10^{-6}$

Примечание. Расчеты произведены при $j=j_{ном}$ по ГОСТ 2332-63; $\eta=0{,}85$, $\gamma_н=200$ г/л.

Формулы (5-5) и (5-6) позволяют определить количество продуктов износа электрощеток, образующихся в машине в течение 1 ч ее работы. Иногда может возникнуть необходимость в определении того количества продуктов износа, которое образуется при полном срабатывании установленного на машине комплекта электрощеток. Опуская промежуточные выкладки, в табл. 5-9 приводим результаты соответствующих расчетов, выполненных для двигателя мощностью $P=1\,000$ кВт, при значениях переменных, указанных в примечании. Переход к машинам других мощностей, равно как и при изменении значений η, j и других, может быть произведен путем пропорционального пересчета содержащихся в табл. 5-9 основных цифр. Время, в течение которого выделится указанное в табл. 5-9 количество продуктов износа электрощеток, зависит от марки материала, из которого они изготовлены, типа машины, условий эксплуатации и других обстоятельств.

Таблица 5-9

Характеристики продуктов износа комплекта электрографитированных щеток, установленного на электрической машине мощностью 1 000 кВт

Номинальная высота электрощеток, мм	Напряжение машины, В	Объем изношенной части электрощеток, см³	Количество продуктов износа электрощеток	
			Масса, г	Объем, л
32	240	1 420	2 400	12,0
	320	1 060	1 800	9,0
	460	740	1 260	6,3
	750	455	770	3,8
	860	395	670	3,4
40	240	2 140	3 600	18,0
	320	1 600	2 700	13,5
	460	1 110	1 900	9,5
	750	680	1 160	5,8
	860	595	1 010	5,0
50	240	2 660	4 550	22,8
	320	2 000	3 400	17,0
	460	1 400	2 370	11,8
	750	850	1 440	7,2
	860	740	1 260	6,3
65	240	3 470	5 950	29,8
	320	2 600	4 400	22,0
	460	1 800	3 050	15,2
	750	1 110	1 900	9,5
	860	960	1 630	8,2

Примечание. Расчеты произведены при $j=11$ А/см², $\eta=0{,}85$, $\gamma_у=1{,}70$ г/см³, $\gamma_н=200$ г/л.

ГЛАВА ШЕСТАЯ

КОММУТИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА

Коммутирующая способность является важнейшей характеристикой электрического скользящего контакта. Это обусловлено тем, что при неудовлетворительном протекании процесса коммутации длительная эксплуатация коллекторных электрических машин оказывается невозможной и прочие показатели работы элементов контакта утрачивают свое практическое значение.

Введенная здесь в рассмотрение характеристика коммутирующей способности скользящего контакта является более емкой, чем рассмотренные ранее характеристики переходного падения напряжения, коэффициента трения

и износа. Происходит это потому, что три последние характеристики определяются природой электрощеточного материала, состоянием среды и такими параметрами электрических машин, которые могут быть названы внешними (материал и состояние рабочих поверхностей коллекторов и контактных колец, окружная скорость и т. п.) Характеристика коммутирующей способности, помимо перечисленных факторов, зависит еще от обмоточных данных, настройки полюсов и ряда других параметров, которые могут быть названы для машин внутренними.

Критерии для оценки коммутирующих свойств скользящего контакта установлены ГОСТ 183-66, в соответствии с которым степени искрения на коллекторах определяются следующим образом:

Таблица 6-1

Степень искрения (класс коммутации)	Характеристика степени искрения	Состояние коллектора и электрощеток
1	Отсутствие искрения (темная коммутация)	—
$1^1/_4$	Слабое точечное искрение под небольшой частью электрощетки	Отсутствие почернения на коллекторе и нагара на электрощетках
$1^1/_2$	Слабое искрение под большей частью электрощетки	Появление следов почернения на коллекторе, легко устраняемых протиранием поверхности коллектора бензином, а также следов нагара на электрощетках
2	Искрение под всем краем электрощетки. Допускается только при кратковременных толчках нагрузки и перегрузки	Появление следов почернения на коллекторе, не устраняемых протиранием поверхности коллектора бензином, а также следов нагара на электрощетках
3	Значительное искрение под всем краем электрощетки с наличием крупных и вылетающих искр. Допускается только для моментов прямого (без реостатных ступеней) включения или реверсирования машин, если при этом коллектор и электрощетки остаются в состоянии, пригодном для дальнейшей работы	Значительное почернение на коллекторе, не устраняемое протиранием поверхности коллектора бензином, а также подгар и разрушение электрощеток

Стандарт 183-66 устанавливает, что при номинальном режиме работы электрических машин степень искрения (класс коммутации) не должен превышать $1\ ^1/_2$. Таким образом, устанавливаемая названным документом система определения допустимого класса коммутации оценивает работу скользящего контакта не по светотехническому эффекту, а по результатам реального воздействия на коллекторе. Недопустимым является такое искрение, при котором на его поверхности появляются следы почернения, не устраняемые протиранием. Выполнение последнего требования составляет предмет особых забот конструкторов и расчетчиков электрических машин, стремящихся свести искрение в скользящем контакте к минимально возможному пределу. Методы решения подобной задачи начали создаваться одновременно с началом применения коллекторных электрических машин. До конца прошлого столетия эти методы являлись эмпирическими. Начиная с последних десятилетий истекшего века до 20-х годов нашего столетия трудами Е. А. Арнольда, П. Жиро, Б. Ламме и других были разработаны теоретические основы коммутационного процесса, которые впоследствии были названы классической теорией коммутации. Явления, происходящие под электрощеткой и в секциях обмотки якоря при переходе их из одной параллельной ветви в другую, классическая теория коммутации описывает с помощью дифференциального уравнения следующего вида:

$$L_c \frac{di}{dt} + i_c r_c - i_н r_н + iR_c + e_к = 0. \qquad (6\text{-}1)$$

В (6-1), справедливом для случая, когда ширина электрощетки $b_щ$ не превышает ширину коллекторного деления $b_к$, применены следующие обозначения: L_c — индуктивность секции; i — ток в секции; $i_н$ — ток в набегающем крае электрощетки; i_c — то же в сбегающем крае; $r_н$ — переходное (контактное) сопротивление в набегающем крае электрощетки; r_c — то же в сбегающем крае; R_c — сопротивление секции; $e_к$ — коммутирующая э. д. с.

Классическая теория коммутации полагает, что контактное сопротивление электрощетки является постоянным ($r_щ$=const) и что это сопротивление на набегающем и сбегающем краях щетки зависит от продолжительности времени t, прошедшего с начала коммутацион-

ного процесса, и определяется следующим образом:

$$r_н = r_щ T/t; \qquad (6\text{-}2)$$

$$r_с = r_щ T/(T-t). \qquad (6\text{-}3)$$

Применив обозначения

$$r_щ T/L_с = \alpha; \qquad (6\text{-}4)$$

$$R_с/L_с = \beta \qquad (6\text{-}5)$$

и произведя простейшие преобразования, удается получить запись исходного дифференциального уравнения (6-1) в следующем виде:

$$di/dt + i_с\alpha/(T-t) - i_н\alpha/t + i\beta + e_к/L_с = 0. \qquad (6\text{-}6)$$

Решение (6-6) позволяет определить полный ток коммутируемой секции и исследовать влияние на него различных параметров машины. Это исследование показывает также, что полный ток может рассматриваться состоящим из тока, определяемого нагрузкой машины, и токов, создаваемых э. д. с., наводимыми в контуре обмоток. В самом общем случае здесь могут наводиться э. д. с. самоиндукции $e_с$ и взаимной индукции $e_в$ и задача расчетчика машины состоит, как известно, в том, чтобы наводимую в секциях обмоток коммутационную э. д. с. $e_к$ направить против $e_с$ и $e_в$ и добиться равенства

$$e_к = -(e_с + e_в) = -e_р, \qquad (6\text{-}7)$$

где $e_р$ — реактивная э. д. с.

Способы вычисления реактивной э. д. с. разрабатывались многими авторами. В практике заводов отечественной электропромышленности для указанной цели применяют формулы, выбираемые исходя из размеров машины. При расчете малых и средних машин пользуются приближенной формулой Пихельмайера:

$$e_р = \frac{\pi}{3} \lambda w_{с.я} l A D_я \frac{n}{1\,000} 10^{-6} В. \qquad (6\text{-}8)$$

Рассчитывая крупные машины, применяют уточненную формулу Рихтера в интерпретации Цорна, записываемую следующим образом:

$$e_р = \frac{2}{3} \frac{I_я}{a} \frac{D_к}{b} \frac{n}{1\,000} w_{с.я} [4U'l(\lambda_п + \lambda_к) + 2\beta_i l_{лоб}\lambda_{лоб}] 10^{-6}. \qquad (6\text{-}9)$$

В двух последних формулах применены следующие обозначения: n — частота вращения, об/мин; λ — эквивалентная удельная магнитная проводимость, приведенная к длине якоря (число потокосцеплений на единицу длины секции, состоящей из одного витка, по которому проходит ток I_a); $\lambda_п$ — средний единичный коэффициент самоиндукции и взаимной индукции; $\lambda_к$ — единичный коэффициент проводимости по коронкам зубцов; $\lambda_{лоб}$ — сумма коэффициентов магнитной проводимости по лобовым частям; $w_{с.я}$ — число витков в секции якоря; l — длина пакетов якоря, см; $l_{лоб}$ — длина одной лобовой части витка обмотки якоря, см; A — линейная нагрузка обмотки якоря, А/см; $D_я$ — наружный диаметр якоря, см; $D_к$ — наружный диаметр коллектора, см; $I_я$ — ток якоря, А; a — число пар параллельных ветвей обмотки якоря; b — ширина щеток, мм; $4U'$ — величина, зависящая от идеального щеточного перекрытия, числа проводников, находящихся в пазу, укорочения обмотки и представляющая собою число высот сумм единичных средних коэффициентов магнитной проводимости, укладывающихся в средней высоте результирующего коэффициента индуктивности паза; β_i — идеальное щеточное перекрытие.

Использование положений классической теории коммутации дает результаты, далеко не всегда совпадающие с данными практики. Еще одним недостатком рассматриваемой теории является ее неспособность осуществить расчет коммутации в случае, когда электрощетка перекрывает несколько коллекторных пластин. Перечисленные обстоятельства привели к тому, что с 1923—1926 гг. в печати начали публиковаться различные предложения по совершенствованию теории коммутационного процесса. Первые подобные публикации были сделаны Л. Дрейфусом. Далее центр проведения исследований рассматриваемого вопроса переместился в нашу страну, где они получили широкое развитие. Одним из первых отечественных авторов, выступивших с предложениями по совершенствованию теории коммутации, явился О. Г. Вегнер, считавший постоянным в скользящем контакте не сопротивление, а переходное падение напряжения $\Delta U = \text{const}$. Дифференциальное уравнение коммутируемого контура в этом случае приобрело вид:

$$e_к - L_с \frac{di}{dt} - iR_с = \Delta U_с - \Delta U_н, \qquad (6\text{-}10)$$

его решение относительно тока коммутируемой секции будет зависеть от соотношения токов i и i_a. В случае, когда $-i_a < i \leqslant i_a$, а $\Delta U_\text{н}$ и $\Delta U_\text{с}$ направлены в разные стороны и взаимно уничтожаются, искомое решение будет:

$$i = \frac{e_\text{к}}{R_\text{с}} (1 - e^{-\beta t}) - i_a e^{-\beta t}. \qquad (6\text{-}11)$$

В случае, когда $i > i_a$, происходит смена знака $\Delta U_\text{с}$, последняя суммируется с $\Delta U_\text{н}$ и решение приобретает вид:

$$i = \frac{e_\text{к} - (\Delta U_\text{н} + \Delta U_\text{с})}{R_\text{с}} (1 - e^{-\beta t}) + i_a e^{-\beta t}. \qquad (6\text{-}12)$$

В двух последних формулах: i_a — ток в параллельной ветви обмотки якоря; β определяется по выражению (6-5).

Важным элементом в теории коммутации О. Г. Вегнера явилось сформулированное им условие завершения процесса коммутации «ступенью малого тока», при котором, начиная с некоторого момента $t < T$ до момента $t = T$, сбегающий край электрощетки токовой нагрузки не несет.

Другие попытки улучшить теорию коммутации принадлежат И. С. Елохину, Б. К. Туру и А. И. Скороспешкину. И. С. Елохин полагает, что сопротивления набегающего и сбегающего краев электрощетки изменяются не плавно в функции времени, как это предположено формулами (6-2) и (6-3), а остаются в течение всего периода коммутации практически постоянными, не зависящими от поверхности соприкосновения с коллекторной пластиной ($r_\text{н} = r_\text{с} = \text{const}$). Б. К. Тур осуществил попытку рассмотрения уравнения коммутируемого контура путем аппроксимации переходного контактного сопротивления по вольт-амперной характеристике скользящего контакта, причем распределение тока в различных частях электрощетки принималось таким же, как и в классической теории коммутации. А. И. Скороспешкин воспользовался предположением о том, что сопротивление щеточного контакта при возрастании плотности тока уменьшается по закону прямой линии. А. С. Курбасов предпринял попытку описать механизм коммутации с энергетических позиций, определив ее как сложный электромеханический процесс, в котором взаимно увязаны не только э. д. с., но и силы механические.

Особенно много исследований, посвященных уточнению и развитию теории коммутационного процесса, выполнено М. Ф. Карасевым с сотрудниками. В указанных работах сформулирован ряд положений, касающихся различных аспектов проблемы коммутации машины постоянного тока и скользящего электрического контакта. На основе вновь разработанных положений по-новому освещены причины искрения электрощеток, роль добавочных полюсов, методы их расчета и многие другие вопросы. В самое последнее время группа М. Ф. Карасева интенсивно развивает новую систему взглядов на коммутационный процесс, которую авторы называют теорией оптимальной коммутации машин постоянного тока. В основе этой теории лежит признание двойственного характера скользящего контакта, проявляющегося в том, что под набегающим краем электрощетки действует условие $\Delta U_\text{щ} = \text{const}$, а для ее сбегающего края справедливо условие $r_\text{щ} = \text{const}$ [Л. 6-1, 6-2]. Исходное уравнение оптимальной коммутации для случаев, подобных ранее рассмотренным, ($b_\text{щ} = b_\text{к}$ и $R_\text{с} \neq 0$) может быть записано следующим образом:

$$L_\text{с} \frac{di}{dt} + i_\text{с} r_\text{с} - \Delta U_\text{н} + i R_\text{с} + e_\text{к} = 0. \qquad (6\text{-}13)$$

Использовав обозначения (6-4) и (6-5) для определения тока коммутации, получим следующее выражение:

$$i = \frac{\Delta U_\text{н} + i_a R_\text{с} - e_\text{к}}{L_\text{с}} (T - t)^\alpha e^{-\beta t} \int \frac{e^{\beta t}}{(T - t)^\alpha} dt - $$
$$- i_a + C e^{-\beta t} (T - t)^\alpha. \qquad (6\text{-}14)$$

Величина коммутирующей э. д. с., необходимая для обеспечения оптимальной коммутации, находится из условие $\Delta U_\text{щ} = \text{const}$, а для ее сбегающего края справед-

$$di/dt = 0 \text{ при } t = 0{,}99\ T.$$

Соответствующие выкладки позволяют получить следующую формулу:

$$e_\text{к} = -\frac{2 i_a L_\text{с}}{T} \times$$
$$\times \frac{\alpha + 0{,}01\beta T}{\Sigma (-1)^n \dfrac{\left(\alpha \dfrac{R_\text{с}}{r_\text{щ}}\right)^{n-1}}{(\alpha - 1)(\alpha - 2) \ldots (\alpha - n)} [0{,}01^{n-\alpha} n - (\alpha + 0{,}01\beta T)]} +$$
$$+ i_a R_\text{с} + \Delta U_\text{н}, \qquad (6\text{-}15)$$

где n — число членов степенного ряда, в который разложена функция $e^{-\beta t}$ при интегрировании выражения (6-14).

Еще один способ решения дифференциального уравнения (6-13) состоит в том, что содержащиеся в нем члены i_c, r_c и $\Delta U_н$ аппроксимируются вольт-амперной характеристикой скользящего контакта и образовавшаяся после этого новая форма уравнения решается методами численного интегрирования с использованием средств вычислительной техники. Авторы описываемого способа, использовав вольт-амперную характеристику вида $2\Delta U = A\ \mathrm{arctg}\ (Bj)$, преобразовали исходное уравнение (6-13) в уравнение

$$L_c \frac{di}{dt} + A\,\mathrm{arctg}\left[BT\,\frac{i_a - i_c}{F\,(T-t)}\right] - - A\,\mathrm{arctg}\left[BT\,\frac{i_a - i_c}{Ft}\right] + iR_c + e_к = 0, \qquad (6\text{-}16)$$

где F — площадь контактной поверхности электрощетки, и для выполнения всех численных расчетов применили электронную цифровую машину «Наири» [Л. 6-2].

Из приведенного описания различных предложений по совершенствованию теории коммутационных процессов с несомненной очевидностью следует, что во всех без исключения случаях знание физических свойств скользящего контакта является совершенно необходимым для управления теми параметрами электрических машин, которые ранее были названы внутренними. Вне зависимости от изложенного может быть также поставлен вопрос о влиянии на коммутационный процесс внешних, не зависящих от машины параметров, и среди них такого, как природа электрощеточных материалов.

В самом деле, практика дает много примеров, указывающих на то, что характер протекания коммутационного процесса на данной машине может изменяться вместе со сменой марки установленных на ней электрощеток. Это послужило поводом для внесения целой серии предложений по оценке коммутирующих свойств собственно электрощеточных материалов. Одним из первых явилось предложение, связывающее свойства материалов с переходным падением напряжения в скользящем контакте. У отдельных авторов можно найти указания на то, что коммутирующие способности электрощеток возрастают вместе со значением $2\Delta U$ [Л. 3-14]. Дальнейшим развитием этой точки зрения явилось предложение, связывающее коммутирующую способность с видом вольт-амперных характеристик электрощеточных материалов. В частности, О. Г. Вегнер [Л. 3-2] предлагал оценивать коммутирующую способность электрощеток с помощью двух показателей: а) амплитудного значения переходного падения напряжения, определяемого по динамической вольт-амперной характеристике при плотности тока в скользящем контакте, равной 2—3% номинальной; б) коэффициента термической устойчивости начальной части вольт-амперной характеристики.

З. Б. Вартанов на основе изучения вольт-амперных характеристик, снятых при различных значениях и длительности импульсов тока и изменяющейся площади скользящего контакта, предложил оценивать коммутирующие свойства электрощеток с помощью среднего значения разности падений напряжения на их сбегающем и набегающем краях:

$$\Delta E_{ср} = (\Delta U_{сб} - \Delta U_{наб})/2.$$

Значения $\Delta U_{сб}$ и $\Delta U_{наб}$ определяются по восходящей и нисходящей ветвям импульсной вольт-амперной характеристики с учетом изменения площади соприкосновения электрощеток с коллектором. При $\Delta E_{ср} = \mathrm{const}$, пренебрегая величиной IR_c и при $t = T$, разрываемый щеткой ток З. Б. Вартанов вычисляет с помощью выражения

$$I_{разр} = 2I_a - \Delta E_{ср} T / L_{ср}.$$

Если $I_{разр} \leqslant 0$, то условием безыскровой коммутации по Вартанову будет: $\Delta E_{ср} \geqslant 2I_a L_{ср}/T$.

А. С. Констансов предлагал оценивать коммутирующую способность электрощеток с помощью кривых $\Delta U_{макс} = \varphi(I)$. Последние снимаются на специальном аппарате, снабженном одной рабочей электрощеткой и катушками, имитирующими обмотки машины. А. П. Кучумов для аналогичной цели пользовался также специально сконструированным аппаратом, состоящим из контактных колец, к которым присоединены параллельные ветви обмотки коммутируемой секции. Параметры последней могут изменяться в широких пределах. Варьируя их, изменяя величину тока в коммутируемой секции и используя при экспериментах электрощетки различных марок, А. П. Кучумов построил графики, подобные изображенным на рис. 6-1. Находящиеся на этом графике

линии называются «порогом искрения». Они разделяют поле графика на две зоны: зону темной коммутации и зону искрения. Взаимное расположение порогов искрения, полученных при испытании электрощеток различных марок, определяет относительную оценку их коммутирующих свойств.

М. Ф. Карасев дифференцировал понятие о коммутирующей способности электрощеток, связав его с двумя факторами: мехническим состоянием коллекторов и элек-



Рис. 6-1. Кривые «порогов искрения», взаимное расположение которых определяет коммутирующую способность электрощеток.

L — индуктивность секции; $2I_a$ — ток секции; *а*, *б* — различные марки электрощеток.

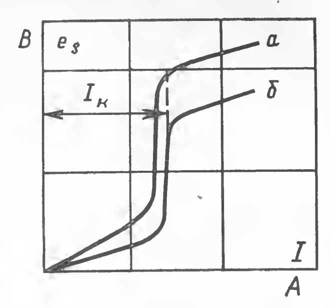


Рис. 6-2. Кривые $e_s=f(I)$, взаимное расположение которых по данным [Л. 6-3] определяет коммутирующую способность электрощеток.

а, *б* — различные марки электрощеток.

тромагнитным состоянием машины. Для изучения влияния последнего М. Ф. Карасев пользовался специальным аппаратом, состоящим из двухпластинчатого коллектора, вращающейся щеточной траверсы и коммутируемой секции с изменяющейся индуктивностью. В процессе проведения экспериментов изменялись ток в цепи и индуктивность секции и определялось амплитудное значение возникавших в ней э. д. с. самоиндукции e_s. В результате проведения опытов по описанной схеме удалось установить, что для электрощеток разных марок связь между наблюдавшимися показателями имеет вид, показанный на рис. 6-2. При этом также было замечено, что в момент, когда величина э. д. с. самоиндукции достигает своего максимального значения $e_s=e_{s\,\text{макс}}$ и перестает дальше изменяться, в скользящем контакте наступает искрение. Все описанные явления происходят при некотором токе в цепи $I=I_к$, который для разных электрощеток оказывается различным. Значение критического тока $I_к$ М. Ф. Карасев и рекомендует считать показателем коммутирующей способности электрощеток. Дальнейшие опыты дали ему возможность установить, что произведение $I_к$ на число витков короткозамкнутой секции для электрощеток каждой марки оказалось постоянной величиной:

$$I_к w=\text{const}=K_щ.$$

Эту величину М. Ф. Карасев называет коммутирующей способностью электрощетки [Л. 6-3]. Позднее М. Ф. Карасев совместно с В. Н. Козловым разрабатывает еще одну экспериментальную установку, с помощью которой на экране осциллографа удается наблюдать ток, реверсируемый электрощетками разных марок без искрения. Этот ток и рекомендуется в качестве количественной оценки коммутирующих свойств.

Из зарубежных исследований заслуживает упоминание работа Ф. Шретера, предложившего оценивать коммутирующие свойства электрощеток по форме кривых тока, получаемых в результате испытания щеток на специально сконструированном стенде [Л. 6-4]. Подробное описание и анализ получаемых с ее помощью данных можно найти в [Л. 6-1, 6-3]. В последнем из названных источников можно найти также описание испытательного стенда, с помощью которого предлагалось оценивать рассматриваемые свойства электрощеток в стандарте США.

Перечень исследований, посвященных разработке критериев оценки коммутирующих свойств электрощеточных материалов, выше изложенным не исчерпывается. В периодической печати можно найти ряд других сообщений по рассматриваемому вопросу. Общим для всех предлагавшихся критериев являлось то, что коммутирующие свойства рекомендовалось оценивать не непосредственно, а с помощью промежуточных параметров, которые использовались в различных теориях, объяснявших причины искрения в скользящем контакте. Таким образом, предлагавшиеся способы решения вопроса являлись своего рода двухступенчатыми, так как требовали изучения влияния электрощеточного материала на промежуточные параметры, а затем изучения влияния этих последних на собственно коммутационный процесс. Бесперспективность применения описанных способов ре-

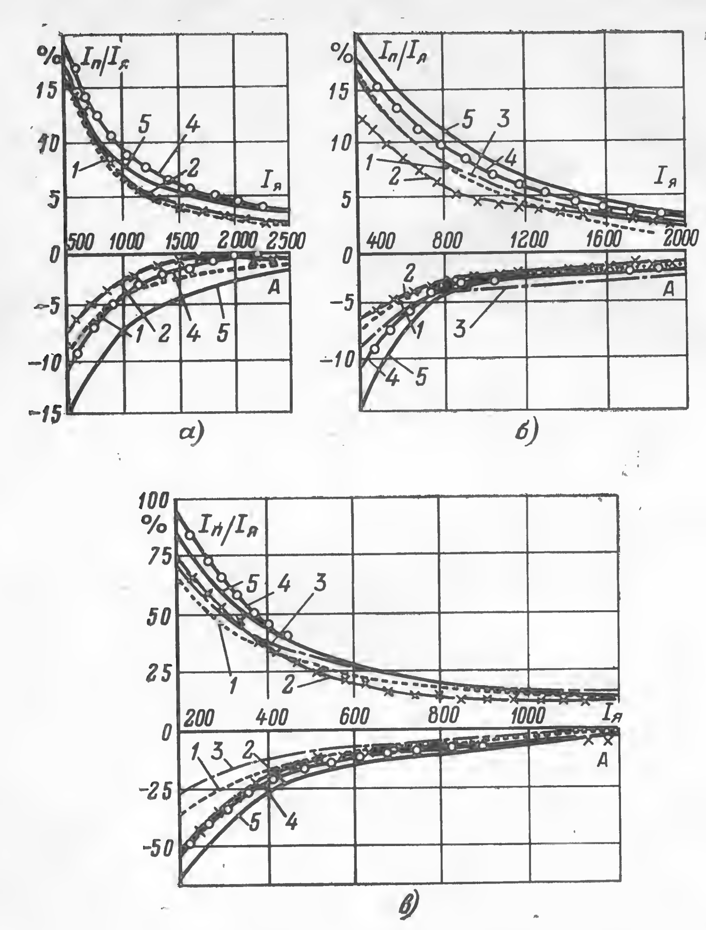


Рис. 6-3. Зоны безыскровой работы ряда типов электрических машин при установке на них щеток различных марок.

а — машина типа ПБК-120/60 (1 600 кВт); *б* — машина типа МП-12-38/8 (485 кВт); *в* — машина типа МПВ-42,3/78/200 (300 кВт); *1* — марка ЭГ4; *2* — марка 611М; *3* — марка ЭГ20; *4* — марка ЭГ14; *5* — марка ЭГ74.

шения поставленной задачи автор отмечал еще в 1958 г. [Л. 6-5]. Лучшим подтверждением справедливости подобной оценки предлагавшихся способов является тот факт, что за весьма значительный период времени их разработки ни один из них не был использован для сравнительной оценки коммутирующих свойств сколько-нибудь обширной номенклатуры марок электрощеточных материалов и доведен до результатов, которые можно было бы применить в практических целях. Все эти результаты

удалось получить благодаря использованию предложенного автором такого способа решения задачи, при котором оценка коммутирующих свойств производится не в связи с той или иной теорией коммутации, а в связи со способностью щеток обеспечивать большую или меньшую зону безыскровой работы реальных электрических машин [Л. 6-5]. Анализ большого количества экспериментально полученных безискровых зон крупных электрических машин позволил установить, что щетки различных марок при использовании на различных машинах образуют различные зоны, но в порядке расположения этих зон имеется вполне определенная закономерность (рис. 6-3). Для последующего анализа выявленной закономерности представилось необходимым разработать какой-либо количественный критерий, позволяющий оценивать сопоставляемые зоны. Простейшим критерием подобной оценки могли бы явиться отношение площадей зон, образованных на машине при ее работе с электрощетками различных марок. Для построений, у которых зоны подобны друг другу, такой прием дает вполне удовлетворительный результат. Однако в общем случае, когда подобие зон нарушается, сравнение площадей дает искаженную картину. Сказанное иллюстрируется рис. 6-4, на котором зона *I* занимает большую площадь, чем зона *II*, однако в смысле обеспечения безыскровой работы она менее благоприятна, так как вся ее площадь реализуется в области малых нагрузок машины. Таким образом, величина площади безыскровой зоны в общем случае не может служить достаточно определенным критерием. Ее нужно дополнительно характеризовать с точки зрения расположения по отношению к осям построений. Сделать это можно с помощью величины, определяемой выражением

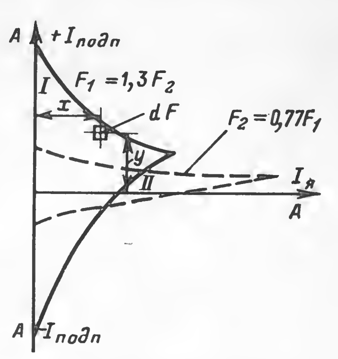


Рис. 6-4. Определение экваториального момента инерции площади зоны безыскровой работы по отношению к оси тока подпитки добавочных полюсов.

$$J_м = \int_{(F)} x^2 dF, \quad (6\text{-}17)$$

из которого следует, что здесь речь идет о сумме произведений элементарных площадок dF на квадраты расстояний их центра тяжести от оси тока подпитки, причем суммирование производится по всей площади зоны (рис. 6-4). Выбор второй степени для координаты x обусловлен необходимостью оттенить ее роль в формировании величины $J_{м}$. Последняя в соответствии с описанным способом ее вычисления может быть названа экваториальным моментом инерции площади зоны безыскровой работы по отношению к оси тока подпитки добавочных полюсов.

Физический смысл показателя $J_{м}$ в условиях рассматриваемой задачи достаточно очевиден. Он характеризует развитие зоны вдоль оси нагрузки и возрастание его численного значения свидетельствует о повышении коммутирующих свойств образующих его электрощеток.

Если величину $J_{м.б}$ для какой-либо произвольно выбранной марки электрощеток принять в качестве базовой, то располагая величинами $J_{м.к}$ для других марок электрощеток, испытанных на данной машине, относительную оценку их коммутирующих свойств удается выразить с помощью отношения, названного индексом коммутации:

$$N = J_{м.к}/J_{м.б}, \qquad (6\text{-}18)$$

где $J_{м.б}$ — экваториальный момент инерции площади зоны безыскровой работы относительно оси тока подпитки, образованной базовой маркой электрощеток, см⁴; $J_{м.к}$ — момент инерции для зон, образованных электрощетками других испытанных на данной машине марок, см⁴.

Анализ большого количества экспериментальных данных, полученных при снятии безыскровых зон на крупных электрических машинах, и вычисление значений индекса коммутации для испытанных на них электрощеток различных марок позволили установить следующее: а) значения индекса коммутации N для каждой марки электрощеточного материала распределены по статистическим законам; б) номинальное значение индекса коммутации конкретной марки электрощеточного материала определяется ее составом; в) для ряда наиболее полно изученных марок электрощеточных материалов номи-

нальные значения индекса коммутации при базовой марке ЭГ4 являются следующими:

Марки материала	611М	ЭГ4	ЭГ20	ЭГ71	ЭГ14	ЭГ8	ЭГ74
Значения N	0,9	1,0	1,2	1,2	1,8	2,2	3,1

Общая закономерность изменения коммутирующих свойств электрощеточных материалов, оцениваемых зна-

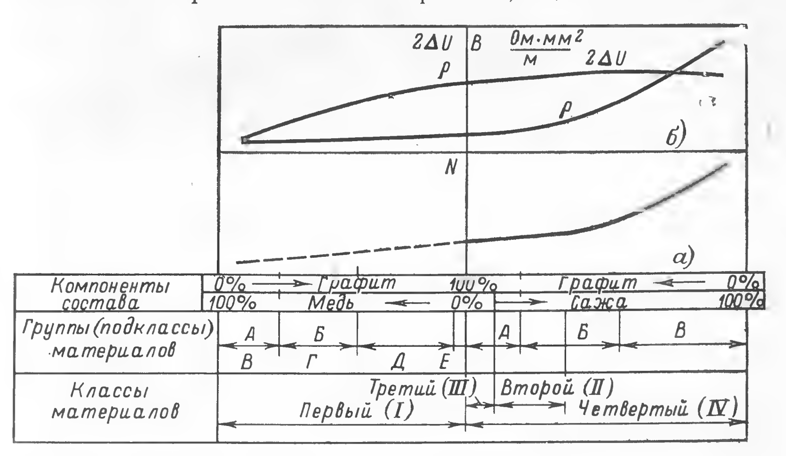


Рис. 6-5. Общая закономерность изменения некоторых характеристик электрощеточных материалов в зависимости от их состава.

чением индекса коммутации N, определяется графиком, изображенным на нижней части рис. 6-5. Правый участок изображенного графика, обозначенный сплошной линией, обоснован экспериментально по данным соответствующих испытаний различных щеток на значительном количестве типов электрощеток машин [Л. 1-4]. Пунктирный участок этого графика является предположительным. Здесь дополнительному уточнению подлежат значения ординат. Что касается самого характера изменения N, то он сомнения не вызывает, так как подтверждается всей практикой использования электрощеток на самых различных этапах их развития.

При рассмотрении представленной на рис. 6-5 общей закономерности изменения коммутирующих способностей электрощеточных материалов интересно выяснить, с какими другими их свойствами согласуется кривая изменения N. С указанной целью на верхнюю часть рис. 6-5

перенесены графики изменения удельного электрического сопротивления ρ (рис. 1-2) и переходного падения напряжения $2\Delta U$ (рис. 3-4,*в*) в зависимости от состава электрощеточных материалов. Из сопоставления линий N и $2\Delta U$ можно заключить, что связь между рассматриваемыми характеристиками проявляется только для материалов I класса. Для электрографитированных материалов IV класса, содержащих значительное количество сажи, связь между показателями N и $2\Delta U$ исчезает. Подобная связь восстанавливается у композиций, содержащих в качестве связующего синтетические смолы, при использовании которых происходит одновременное возрастание $2\Delta U$ и N.

Особенно много для понимания физических основ формирования коммутирующих свойств электрощеточных материалов дает факт полного согласования линий N и ρ. По-видимому, подобное согласование не может являться случайным, а является следствием глубокой физической связи между изучаемыми характеристиками. Современные представления о физических свойствах твердых проводников приводят к следующей формуле для определения удельного электрического сопротивления, Ом·м:

$$\rho = 1/ne\mu = E/e\ 1/nv, \qquad (6\text{-}19)$$

где n — число свободных электронов в единице объема материала; e — заряд электрона, Кл; μ — подвижность электронов, м/с, м/В; E — напряженность электрического поля, В/м; v — скорость дрейфа электрона, м/с.

Очевидно, что возрастание ρ, а вместе с ним и N при постоянном E (т. е. на данной машине) связано с уменьшением числа свободных носителей тока в единице объема материала n. Последнее обусловлено строением веществ, слагающих этот материал. Элементарные кристаллические решетки и структурные схемы меди, графита, кокса и сажи, используемых при изготовлении электрощеточных материалов, описывались в первой главе, где было показано, что упорядоченность структур для перечисленных веществ снижается в той последовательности, в которой они здесь перечислены. В менее упорядоченных структурах движению носителей тока препятствуют потенциальные барьеры на границах образований. Число таких барьеров растет по мере уменьшения размеров частиц, слагающих материал. Таким образом,

оказывается, что удельное электрическое сопротивление электрощеточных материалов и коммутирующие способности изготовленных из них электрощеток неизменно повышаются по мере того, как все менее упорядоченной становится структура веществ, из которых эти материалы слагаются. Структура веществ оказывает влияние на удельное электрическое сопротивление и коммутирующую способность не сама по себе. Поскольку со структурой связан ряд других характеристик вещества, то естественно предположить, что и они должны быть тем или иным образом связаны с величинами ρ и N. Одной из таких характеристик является уровень Ферми W. Так как последний при принятых в (6-19) обозначениях может быть вычислен с помощью выражения:

$$W = 3{,}64n^{2/3}\ 10^{-19} = 3{,}64\left(\frac{E}{e}\ \frac{1}{\rho v}\right)^{2/3} 10^{-14}, \qquad (6\text{-}20)$$

то естественно, что W будет уменьшаться по мере возрастания ρ и N.

У углеродистых материалов существенное влияние на коммутирующие свойства оказывает их способность к графитации. Графитация этих материалов представляет собою процесс образования кристаллического углерода в форме графита. Физически названный процесс обусловлен переходом двухмерных шестичленных образований в трехмерные, кристаллические. Возможность перехода определяется схемой структуры материала. Материалы, кристаллиты которых ориентированы более или менее параллельно и не имеют развитых перекрестных связей, как, например, у кокса (рис. 1-1,*в*), графитируются достаточно хорошо. Углеродистые материалы, подобные саже и древесному углю, кристаллиты которых не имеют предпочтительной ориентации и перекрестные связи между которыми развиты весьма значительно (рис. 1-1,*г*), графитируются очень плохо. Таким образом, коммутирующие свойства электрощеточных материалов оказываются находящимися в обратной зависимости от способности слагающих их веществ к графитации. Этим и объясняется тот факт, что выпускаемые всеми отечественными и зарубежными предприятиями щетки, предназначенные для использования на электрических машинах с наиболее тяжелыми условиями коммутации, имеют в своем составе в качестве основного компонента не графит, а сажу.

Помимо рассмотренного на коммутационный процесс электрических машин также оказывают влияние и многие другие факторы. При последующем изучении этих факторов представляется целесообразным воспользоваться введенным ранее понятием об индексе коммутации N. Вычисляя последний, необходимо позаботиться

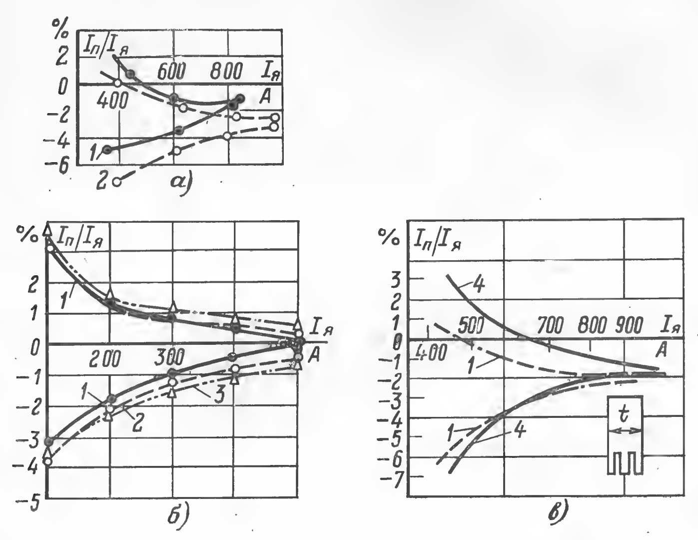


Рис. 6-6. Изменение зон безыскровой работы электрических машин при установке на них щеток различной конструкции.

а, б, в — различные типы машин постоянного тока напряжением 200—300 В. Конструкции щеток: *1* — неразрезная; *2* — разрезная из двух частей; *3* — разрезная из четырех частей; *4* — неразрезная со шлицами на контактной поверхности.

о правильном выборе базовой зоны, которая определяется характером конкретной изучаемой задачи. Соблюдение отмеченного условия позволяет производить количественную оценку влияния рассматриваемого фактора на коммутирующие свойства контакта и давать эту оценку с той же полнотой, с которой ранее изучались его характеристики переходного падения напряжения, коэффициента трения и износа. Проиллюстрируем последнее утверждение на примерах решения ряда конкретных задач. В качестве первой из них рассмотрим, как влияет на коммутацию конструкция электрощеток. На рис. 6-6, *а* и *б* показаны зоны безыскровой работы двух электрических машин при последовательной установке на них

щеток неразрезной и разрезной конструкции, а на рис. 6-6,*в* — зоны машины со щетками, контактные поверхности которых были гладкими, а затем снабжены шлицами (прорезями). Если принять значение индекса коммутации для щеток неразрезной конструкции и не имеющих шлицев $N=1$, то для щетки, состоящей из двух частей, $N=1{,}4$; для щетки, состоящей из четырех частей, $N=1{,}9$; для щетки, имеющей шлицы, $N=1{,}5$. Улучшение коммутирующих свойств происходит также при установке амортизирующих (резиновых) накладок на электрощетках, при замене на крупных электрических машинах реактивных щеткодержателей радиальными и при придании контактной поверхности электрощеток формы, отличной от прямоугольника. В [Л. 5-7] указывается, что искрение последовательно уменьшается при переходе от прямоугольного сечения электрощетки к полукругу, трапеции, ромбу, кругу и равностороннему треугольнику. Описываемый эффект достигается за счет возрастания переходного сопротивления щеточного контакта на завершающем этапе коммутации.

Еще одним способом воздействия на коммутационный процесс может являться рациональный выбор тангенциального размера электрощетки. Положение последней величины в формуле (6-9) таково, что по мере возрастания этой величины значение $e_р$ должно уменьшаться. Физически это объясняется очень просто: с ростом b увеличивается продолжительность периода коммутации T и соответственно снижается скорость изменения тока в коммутируемых секциях во времени. При этом, однако, не следует упускать из виду, что одновременно с увеличением b возрастает число секций, участвующих в процессе коммутации ($4U'$). Аналитически можно показать, что уменьшение реактивной э. д. с. удается достичь только в том случае, когда $4U'$ возрастает медленнее, чем β_i. Таким образом, следует ожидать, что по мере увеличения тангенциального размера электрощеток ширина безыскровых зон должна сначала возрастать, а затем снижаться. Экспериментальное подтверждение описываемого явления иллюстрируется данными табл. 6-2, где приведены сведения об изменении коммутирующих свойств в контакте при изменении тангенциальных размеров электрощеток. Изменение этих размеров осуществилось путем установки электрощеток с раздвижкой, т. е. по схеме, когда их набегающие и

Таблица 6-2

Изменение индекса коммутации N в зависимости от раздвижки электрощеток

Сведения о машинах				Сведения о щетках		Величина раздвижки, мм	Значение индекса коммутации N
Тип	Техническая характеристика			Размер, мм	Марка		
	Мощность, кВт	Напряжение, В	Частота вращения якоря, об/мин				
ПН-1000	85	115	970	25×32×40	ЭГ4	0 5 10	1,0 3,0 2,6
ВТ-450-3000	450	320	3 000	2 (15×30×40)	ЭГ74	4 8	1,0 1,4
GTKUL-135-346	1 370	400	325	2 (12,5×25×60)	EG12	0 4 6	1,0 2,4 2,8
GTKUL-135-346	1 370	400	325	2 (12,5×25×60)	ЭГ14	0 6	1,0 4,0
GTKUL-220-5010	2 560	400	180	2 (12,5×25×60)	ЭГ14	0 8	1,0 2,7

сбегающие края располагались не вдоль прямой линии, а с некоторым отступлением от нее (ступенчато). Подобная установка осуществляется с помощью прокладок разной толщины, помещаемых между щеткодержателями и бракетами.

Практическое использование излагаемых здесь представлений о влиянии тангенциального размера электрощеток на коммутационный процесс осуществлено при наладке работы мощных машин типа ПБК-215/40, используемых в качестве преобразовательных агрегатов обжимных станков. Практика эксплуатации восьми генераторов названного типа на четырех металлургических предприятиях показала, что при использовании электрощеток марок ЭГ2А, ЭГ4 и ЭГ14 машины работали недостаточно надежно в основном из-за дефектов щеточно-коллекторного узла. Для устранения отмеченных дефектов на машинах заменили реактивные щеткодержатели радиальными, установив с раздвижкой по схеме, показанной на рис. 6-7. При новой расстановке щеток на генераторе № 1 в заключительном этапе коммутационного

процесса участвует восемь щеток, перекрывающих семь коллекторных пластин, на генераторе № 2 — четыре щетки, перекрывающие 7,5 пластин. В результате описанной перестановки работа узла токосъема полностью нормализовалась. Генераторы оказались способными работать со щетками любых электрографитированных марок, в том числе и тех, которые ранее являлись совершенно непригодными [Л. 6-6].

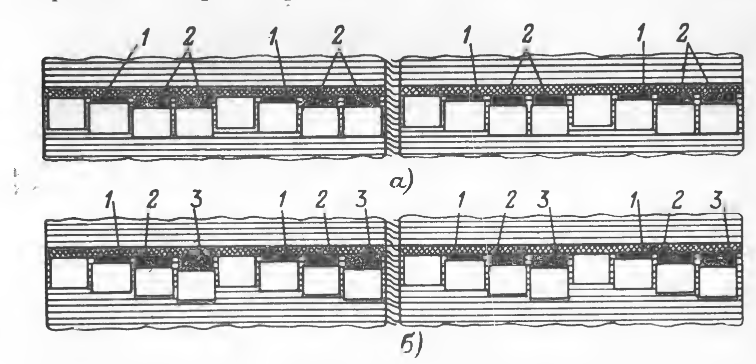


Рис. 6-7. Схема расстановки щеткодержателей на машинах типа ПБК-215/40.

а — генератор № 1; *б* — генератор № 2; *1* — прокладка толщиной 4 мм; *2* — то же 8 мм; *3* — то же 11 мм.

Анализ формул (6-8) и (6-9) позволяет предсказать характер влияния частоты вращения машины n на значение индекса коммутации: очевидно, что оба названных показателя связаны обратно пропорциональной зависимостью. Количественная оценка рассматриваемой связи представлена в табл. 6-3. В табл. 6-4—6-6 содержится информация о влиянии на коммутационные показатели удельного давления на электрощетки p, изменения полярности главных полюсов и частоты тока, питающего машину. Сведения первой из приведенных таблиц свидетельствуют о том, что изменяя величину удельного нажатия на электрощетки, можно добиться расширения безыскровых зон. Оптимальное значение давления может быть установлено опытным путем. Изменения прямого порядка чередования полярности главных полюсов на обратный, как и увеличение частоты питающего тока, приводят к снижению коммутационных возможностей.

Таблица 6-3

Изменение индекса коммутации N в зависимости от частоты вращения якоря машины

Тип машины	Мощность, кВт	Частота вращения якоря, об/мин	Индекс коммутации N
ПН-100	3,3	2 100 1 400 700	1,0 4,8 20,6
ПВ-62	13	2 200 1 650	1,0 1,4
МП-1200-65 (зав. № 15270)	8 840	90 65	1,0 1,6
МП-6800-340 (зав. № 15166)	5 000	500 270	1,0 2,1
МП-6800-340 (зав. № 15167)	5 000	500 270	1,0 1,7
МП-6800-340 (зав. № 15185)	5 000	500 270	1,0 3,5
GTKUL-135/346	1 370	400 325	1,0 1,1
ПВ-32	2,4	2 000 1 500 700	1,0 9,5 17,4

Рассмотрим далее сведения, касающиеся связи между коммутирующими способностями электрощеток и их полярностью. Факт существования подобной связи наблюдался многими исследователями, большая часть которых отмечала, что при постепенном возрастании нагрузки на машины первыми начинают искрить анодно-поляризованные электрощетки [Л. 3-2, 5-7]. Поскольку подобное обстоятельство хорошо согласуется с приведенным в главе 3 неравенством $\Delta U_{-} > \Delta U_{+}$, то естественно заключить, что и в данном случае проявляет себя та общая закономерность влияния $2\Delta U$ на N, которая изображена на рис. 6-5. Правда, в последнем случае связь между изучаемыми характеристиками на правом участке

Таблица 6-4

Изменение индекса коммутации N в зависимости от удельного давления на электрощетки

Тип машины	Мощность, кВт	Марка электрощеток	Удельное давление на щетки, гПа (гс/см²)	Индекс коммутации N
В6-130*	130	ЭГ15Б ЭГ15Б 611М 611М	150 200 200 300	1,00 1,24 1,00 3,22
ЭДТ-200Б	200	611М 611М	250—300 375—450	1,00 4,00

* Экспериментальные данные взяты из технического отчета ЛенФВНИИЭМ.

Таблица 6-5

Изменение индекса коммутации N в зависимости от полярности главных полюсов

(по данным [Л. 6-7])

Сведения о машине				Полярность главных полюсов	
Тип	Мощность, кВт	Напряжение, В	Обмотка якоря	Прямая	Обратная
ПН-400	50	115	Лягушечья	1,0	1,0
ПН-1000	80	230	Волновая	1,0	0,8
ПН-750	105	230	Петлевая	1,0	0,6

Примечание. Испытания проводились в генераторном режиме работы машины.

Таблица 6-6

Изменение индекса коммутации N в зависимости от частоты тока, питающего машину

(по данным [Л. 6-8])

Частота вращения якоря машины, об/мин	Частота питающего тока		
	Постоянный	16 2/3 Гц	50 Гц
1 000	1,00	0,40	0,03
2 000	1,00	0,44	0,01

соответствующих кривых нарушается, однако в самом общем виде она все же существует и приводимые объяснения причин, придающих катодно-поляризованным электрощеткам более высокие коммутирующие свойства, в первом приближении, могут быть признаны удовлетворительными. Без подобной оговорки к аналогичному выводу приходят и другие исследователи данного вопроса [Л. 3-8, 6-8].

Проявленная здесь осторожность в оценке влияния показателя $2\Delta U$ на N обусловлена тем, что существуют обстоятельства, при которых отмеченная на рис. 6-5 общая закономерность, связывающая названные характеристики, нарушается. Именно так обстоит дело при использовании пропитанных электрощеток. В гл. 3 отмечалось, что введение пропитывающих веществ в электрощеточные материалы увеличивает переходное падение напряжения на 10—20%, однако возрастания коммутирующих свойств при этом обычно не происходит. Анализ соответствующих безыскровых зон показывает, что в большинстве случаев наблюдается даже некоторое снижение значений индекса коммутации. Исключение составляют случаи, когда непропитанные электрощетки работают с вибрациями и введение пропитки эти вибрации устраняет. При отмеченных условиях индекс коммутации возрастает. Объяснение этого явления требует постановки дальнейших экспериментов.

Влияние степени нагрева коллектора на коммутационный процесс в практике отмечено давно, но надежных количественных оценок этого влияния ранее не существовало. В одной из новых работ М. Ф. Карасева с сотрудниками рассматриваемый вопрос изучался путем введения в коммутируемый контур коммутирующей э. д. с. $e_к$ и путем изменения тока подпитки добавочных полюсов $I_п$. Оба параметра выбирались из условия поддержания оптимального состояния коммутационного процесса на данной установке при различной температуре коллектора. Оказалось, что значения величин $e_к$ и $I_п$ при изменении температуры коллектора от 50 до 70 °С снижаются, а при дальнейшем повышении температуры начинают возрастать [Л. 3-9]. Сопоставляя этот факт с ранее упоминавшимся характером изменения кривой $2\Delta U=f(T)$ и имея в виду существование зависимости между $2\Delta U$ и N, можно предсказать повышение коммутирующей способности электрического скользящего контакта при нагреве его свыше 100 °С. Именно такая оценка возможности работы контакта при повышенных температурах его нагрева содержится в [Л. 6-9], где утверждается, что наиболее благоприятная температура для работы коллекторов и контактных колец находится в пределах 150—160 °С.

Нормальное протекание коммутационного процесса зависит еще от состава атмосферы, окружающей эксплуатируемые электрические машины. Так, если в составе окружающего воздуха окажется сероводород, то коллекторная политура начнет интенсивно адсорбировать его на своей поверхности, потускнеет и потеряет способность защищать от дальнейшего обогащения сульфидами находящуюся под ней медь коллектора. По данным [Л. 3-12], если на 1 млн. частей атмосферы будет приходиться 210 тыс. частей кислорода и только 0,03 части сероводорода, то тусклая политура будет содержать в себе 10—15% сульфида меди и 85—90% окиси меди. Концентрация сероводорода, способная вызвать нарушение работы контакта, ниже той, которая ощущается обонянием. О его присутствии в атмосфере можно судить по такому косвенному признаку, как потускнение цвета меди коллектора, не соприкасающейся с электрощетками. Нейтрализовать действие сероводорода удается введением в состав атмосферы хлора. Последний, соединяясь с коллекторной медью, вызывает образование хлористой меди, которая, взаимодействуя с кислородом воздуха, образует окись меди, т. е. образует политуру требуемого состава.

В [Л. 3-12] описан случай ухудшения коммутации при загрязнении атмосферы газообразными углеводородами. Они не вызывают изменения вида политуры, но под действием тепла и благодаря каталитическому действию меди могут превращаться в смолистые фракции. Последние осаждаются на медных поверхностях деталей узла токосъема (щеткодержатели, щеточная арматура) и затрудняют их работу.

Особый интерес приобрело в последние годы изучение влияния на коммутацию кремнийсодержащих соединений в окружающей атмосфере. В [Л. 3-12] описаны испытания двухъякорного электромашинного агрегата закрытого типа с кремнийорганической изоляцией, в процессе проведения которых было установлено, что при значительных нагрузках агрегата коммутация резко

ухудшалась. В [Л. 6-10] описаны явления нарушения коммутации закрытых гребных двигателей с кремнийорганической изоляцией, используемых на подводных лодках военно-морского флота США. Некоторые сведения о причинах нарушения коммутации в описываемых условиях изложены в [Л. 3-13]. Наряду с перечисленными имеются публикации, в которых при описании дефектов работы электрических машин с кремнийорганической изоляцией о расстройствах коммутации ничего не сказано. В практике работы автора имели место многочисленные случаи, когда присутствие кремнийорганических соединений в зоне скользящего контакта электрических машин, вызывавшее катастрофическое возрастание скорости изнашивания электрощеток, к расстройству коммутации не приводило.

При рассмотрении влияния атмосферы на коммутирующие свойства необходимо остановиться на тех изменениях указанных свойств, которые обусловлены подъемом электрических машин на высоту. Параметры высотной атмосферы таковы, что все характеристики работающего в нем электрического контакта претерпевают изменения. Естественно, что и коммутационная характеристика не составляет исключения и ее изменение направлено в сторону резкого ухудшения. Нормализация работы скользящего контакта в высотных условиях достигается за счет применения металлсодержащих материалов, облагороженных добавками олова, свинца или обоих названных компонентов одновременно (материалы групп IA и IB). Для указанной цели с успехом используются также электрощеточные материалы «черных» марок, изготовленные с применением особых технологических приемов и снабженные соответствующими пропитывающими веществами.

В заключение несколько слов о влиянии на коммутационные свойства среды жидкого диэлектрика. Особенность работы скользящего контакта в подобной среде состоит в появлении гидродинамических усилий, расклинивающих контактирующие элементы. В результате в зоне контакта возникает интенсивное искрение, вызывающее разложение масла. Для устранения описываемого явления необходимо повысить давление на электрощетки, сделать в них аксиальные (декомпрессионные) каналы и тогда для изготовления электрощеток окажется возможным использовать серийные электрощеточные

материалы по ГОСТ 2332-63. Общая закономерность изменения коммутирующих свойств электрощеточных материалов, используемых в среде жидкого диэлектрика, остается такой же, как и при их работе в воздушной среде. Однако большую роль при эксплуатации контакта в среде трансформаторного масла играют абразивные свойства электрощеточных материалов, способствующие очищению поверхности скольжения коллекторов. По указанной причине в маслонаполненных машинах постоянного тока признано целесообразным применять металлсодержащие электрощетки. Об этом, в частности, сообщается в [Л. 6-11]. Согласно этой работе для рассматриваемых условий эксплуатации и наличии коллекторов, изготовленных из стальных пластин при окружной скорости на их рабочей поверхности свыше 10 м/с, лучшие результаты дает применение электрощеток марки МГСО. При пониженных значениях окружной скорости на коллекторе в составе рецептуры электрощеточного материала медь может замещаться железом [Л. 6-11].

ГЛАВА СЕДЬМАЯ
ДИНАМИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СКОЛЬЗЯЩЕГО КОНТАКТА

При рассмотрении различных характеристик совместной работы элементов электрического скользящего контакта отмечалось, что все они тем или иным образом оказываются связанными с одной группой воздействующих на них факторов, объединенных общим названием «механические». Подобное обстоятельство делает необходимым рассмотрение динамики взаимодействия контактирующих элементов, причем главнейшим в этом рассмотрении должно являться не только выявление условий обеспечения безотрывной работы деталей узла токосъема, но и поддержания между ними требуемого контактного давления. Последняя задача возникает в связи с тем, что при изменении этого давления происходят изменения всех прочих характеристик совместной работы элементов контакта. Общие закономерности подобных изменений достаточно подробно рассматривались ранее.

В наиболее полном виде воздействие механических факторов на работу скользящего контакта проявляется при эксплуатации коллекторных электрических машин. Здесь причинами нарушения взаимного контакта электрощетки с коллектором могут являться: а) динамическая неуравновешенность вращающихся частей; б) эксцентриситет поверхности скольжения относительно оси ее вращения; в) волнистость поверхности скольжения; г) выступание группы коллекторных пластин; д) неупорядоченное выступание отдельной коллекторной пластины; е) выступание слюды; ж) шероховатость

поверхности скольжения; з) особые фрикционные свойства поверхности скольжения; и) воздействие внешних возмущающих факторов.

Нарушения контакта от перечисленных причин происходят из-за перемещения электрощеток относительно своего равновесного положения на коллекторе, т. е. из-за вибраций. Отмечаемые перемещения могут быть разложены на две составляющие: радиальную и тангенциальную. Соотношение между ними определяется характером причины, вызвавшей вибрацию, и фасоном электрощетки (радиальный, реактивный). Радиальная составляющая перемещения электрощетки (установленной в радиальном щеткодержателе), которое вызвано наличием у коллектора, вращающегося с угловой скоростью ω, эксцентриситета величиной Δ_1, определяется с помощью выражения

$$x=\Delta_1 \sin \omega t. \tag{7-1}$$

Скорость и ускорение, присущие перемещению вибрирующей электрощетки, оказываются соответственно равными:

$$v=\frac{dx}{dt}=\Delta_1\omega \cos \omega t; \tag{7-2}$$

$$a=\frac{d^2x}{dt^2}=-\Delta_1\omega^2 \sin \omega t, \tag{7-3}$$

причем максимальное значение ускорения при этом будет:

$$a_{\text{макс}}=\Delta_1\omega^2=\Delta_1(\pi n/30)^2. \tag{7-4}$$

Кроме того, на электрощетку площадью поперечного сечения F и высотой h действует сила P, прижимающая ее к коллектору. Ускорение, сообщаемое последней, достигает следующего значения:

$$a_P=Pg/Fh\gamma=pg/h\gamma, \tag{7-5}$$

где g — ускорение силы тяжести, см/с²; γ — плотность материала электрощетки, г/см³; p — удельное нажатие на электрощетку, гПа (гс/см²); h — высота (радиальный размер) электрощетки, см.

Для того чтобы контакт не был нарушен, необходимо обеспечить соблюдение соотношения

$$a_{\text{макс}}\leqslant a_P \tag{7-6}$$

или, что то же,

$$\Delta_1(\pi n/30)^2\leqslant\frac{pg}{h\gamma}. \tag{7-7}$$

В случае отрыва электрощетки от коллектора давление в контакте снижается до нуля. При других соотношениях, возникающих в элементах системы ускорений, контактное давление будет изменяться по периодическому закону. Очевидно, что для создания наиболее благоприятных условий функционирования скользящего контакта необходимо позаботиться о том, чтобы возникающая между образующими его элементами сила взаимодействия была не менее

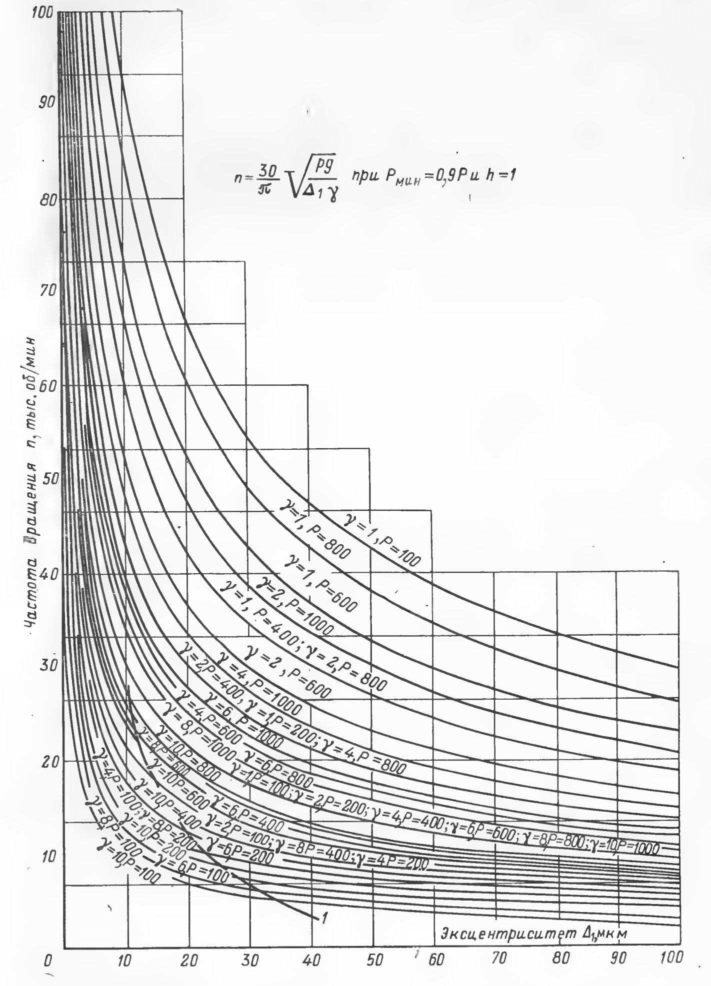


Рис. 7-1. Связь между значениями Δ_1 и n при разных γ и p, удовлетворяющая условию (7-7) при $P_{\text{мин}}=0{,}9\,P$.

1 — значение эксцентриситета, рекомендуемое [Л. 7-1].

некоторой величины $P_{мин}$. Значение последней желательно приблизить к величине нажатия на электрощетку P, определяемой на основании опыта эксплуатации или по каталожным данным. Поскольку расхождения между P и $P_{мин}$ обусловлены ускорениями элементов контакта, а они для случая безотрывной работы связаны между собой соотношением (7-7), то аналитическое исследование последнего позволяет выявить влияние входящих в него величин на динамику работы контакта. Рассчитанные в [Л. 5-7] графики, иллюстрирующие связь между величиной эксцентриситета коллектора Δ_1 и частотой вращения якоря n при различных значениях плотности электрощеточного материала γ и удельного давления на электрощетку p при ее единичной высоте ($h=1$), показаны на рис. 7-1. Графики рассчитаны для условия, когда $P_{мин}=0{,}9P$, что обеспечивает достаточную стабильность режима работы контакта.

Частота вращения якоря машины определяется техническим заданием на ее разработку; плотность электрощеточного материала зависит от выбранной марки этого материала, т. е. от его состава (рис. 1-2); удельное нажатие на электрощетку определяется условиями эксплуатации машины. При указанных обстоятельствах допустимый эксцентриситет оказывается для различных условий работы различным. Однако в практике отечественного электромашиностроения допустимый эксцентриситет принято определять не по данным расчета отдельных частных случаев эксплуатации щеточно-коллекторного узла, а с помощью норм, установленных опытным путем. Последние определяют не эксцентриситет Δ_1, а биение, которое численно равно удвоенному значению Δ_1. При изготовлении коллекторов машин постоянного тока и контактных колец асинхронных и синхронных машин, предназначенных для общепромышленного применения, допустимые биения нормируются ведомственной нормалью 6АА.670.01Н-57. Согласно названному документу допустимые биения не должны превышать величин, указанных в табл. 7-1. В специальном электромашиностроении принято считать, что нормальная работа щеточно-коллекторного узла не будет нарушена, если биение коллектора не превысит значений, приведенных в табл. 7-2 [Л. 7-1].

По данным [Л. 7-2] при изготовлении авиационных электрических машин предельно допустимое биение их коллекторов должно укладываться в пределы, указанные в табл. 7-3.

Как установленные в [Л. 7-1] предельно допустимые биения коллекторов согласуются с рассчитанными по (7-7) значениями эксцентриситетов, показывает линия *1* на рис. 7-1. Расположение последней свидетельствует о том, что для всех существующих электрощеточных материалов (рис. 1-2) выполнение эмпирических норм обеспечивает нормальную работу элементов контакта при частотах вращения якорей машин до 20 000—25 000 об/мин. При превышении указанных значений определяемая в [Л. 7-1] тенденция изменения допустимых биений должна изменяться и их численные значения должны быть существенно уменьшены в отдельных случаях до 2—5 мкм [Л. 5-7].

Зарубежные авторы, исследующие рассматриваемый вопрос, считают, что при окружных скоростях на поверхности скольжения коллектора более 45 м/с допустимое биение не должно превышать 13 мкм; при скоростях, лежащих в пределах 25—45 м/с, эта цифра может быть повышена до 25 мкм и, наконец, при скорости менее 25 м/с общее биение может доходить до 76 мкм [Л. 7-3]. В [Л. 7-4]

Таблица 7-1

Предельные допустимые биения коллекторов и контактных колец, мкм

I. Для коллекторов

Диаметр коллектора, мм	Рабочая частота вращения машины, об/мин: до 100		100—400		400—600		600—850		850—1 250		1 250—6 500	
	Состояние коллектора											
	холодное	горячее	холодное	горячее	холодное	горячее	холодное	горячее	холодное	горячее	холодное	горячее
До 350	—	—	40	60	30	50	30	50	20	40	20	30
350—600	—	—	40	60	30	50	30	50	20	40	20	30
600—900	50	80	40	70	30	60	30	50	20	40	—	—
900—1 500	50	90	40	70	30	60	—	—	—	—	—	—
Свыше 1 500	60	100	40	80	—	—	—	—	—	—	—	—

II. Для контактных колец асинхронных и синхронных машин

Диаметр контактного кольца, мм	Синхронная частота вращения машины, об/мин: до 200		200—500		500—1 000		1 000—1 500		1 500—3 000	
	Состояние контактных колец									
	холодное	горячее	холодное	горячее	холодное	горячее	холодное	горячее	холодное	горячее
До 200	—	—	—	—	40	60	30	50	30	40
200—360	—	—	40	70	40	70	30	60	—	—
360—600	—	—	50	80	50	80	—	—	—	—
600—1 000	60	100	60	90	—	—	—	—	—	—

Примечание. Допустимые биения в 2 раза превышают вызывающие их эксцентриситеты.

Таблица 7-2

Частота вращения коллектора, об/мин	Предельно допустимое биение, мкм	Частота вращения коллектора, об/мин	Предельно допустимое биение, мкм
До 3 000	80	12 000—15 000	36
3 000—5 000	70	15 000—18 000	32
5 000—7 000	60	18 000—21 000	28
7 000—9 000	50	21 000—25 000	24
9 000—12 000	40		

Таблица 7-3

Диаметр коллектора, мм	Максимально допустимое биение коллектора, мкм	
	на валу якоря	в собранной машине
<30	10	20
30—60	15	20
60—100	20	25
100—125	25	30

приводится эмпирическая формула для определения допустимого биения коллектора:

$$\Delta_1 = 0{,}047 D_к^{0,16}/n_{макс}^{0,14}, \qquad (7\text{-}8)$$

где $D_к$ — диаметр коллектора, мм; $n_{макс}$ — максимальная частота его вращения, об/мин.

Рассмотрение влияния эксцентриситета на режим работы контакта будет неполным, если не коснуться вопроса о возникающих при наличии этого эксцентриситета дополнительных механических нагрузках на электрощетку. Последние определяются массой электрощетки и ускорением, с которым она перемещается. Некоторое представление о возникающих при описываемых условиях дополнительных механических нагрузках на электрощетку дают следующие заимствованные из [Л. 7-1] цифры, указанные в табл. 7-4.

Таблица 7-4

Частота вращения, об/мин	Частота колебаний, Гц	Нагрузка в ускорениях силы тяжести g при эксцентриситете	
		20 мкм	30 мкм
6 000	100	0,82	1,25
8 000	133	1,46	2,15
12 000	200	3,29	4,90
20 000	333	9,20	13,50

Указанное справедливо и в случае, когда поверхность скольжения коллектора имеет волнистость или группы выступающих пластин, более или менее равномерно расположенных по всей длине его окружности. В данном случае амплитуда колебаний электрощетки будет определяться степенью отклонения профиля реальной поверхности скольжения от линии идеальной окружности, а частота колебания окажется зависящей от того, как по длине этой окружности расположатся группы выступающих пластин и фазы изменения волнистости. Если, например, на наружности коллектора длиной $\pi D_к$ синусоида волнистости или группы выступавших пластин уложится k раз, то вызванная ими частота колебаний окажется равной $f = kn/60$, а угловая скорость, с которой прикладывается возмущающая сила, приобретает значение $\omega = \pi kn/30$. Соответственно множитель k появится также и в (7-1)—(7-3) и др.

Рассмотренные закономерности перемещения (колебаний) электрощеток относились к случаю, когда в процессе их работы не происходило нарушения контакта с коллектором. Если по каким-либо причинам этот контакт окажется нарушенным и произойдет отрыв электрощетки от коллектора, то характер ее перемещений существенно изменится. В последнем случае гармонические колебания системы приобретают ряд особенностей, вызванных ударом опускающейся на коллектор электрощетки о его рабочую поверхность. Поскольку жесткость системы при описываемых условиях становится периодической функцией времени (периодическое возникновение ударов), для исследования законов движения электрощеток приходится применять методы нелинейной механики. Согласно упомянутым методам параметры перемещения вибрирующей электрощетки оказываются зависящими и от физических свойств материала, из которого она изготовлена, и резонансное состояние системы возникает не в соответствии с условием $\varepsilon = \omega_с/\omega_в = 1$, а в случае, когда

$$\varepsilon = \omega_с/\omega_в \approx 0{,}5, \qquad (7\text{-}9)$$

где $\omega_с$ и $\omega_в$ являются соответственно частотами собственных и вынужденных колебаний системы, определяемыми так же, как это делается при изучении обычных линейных колебаний. Принципиально новым в рассматриваемых системах, испытывающих в процессе колебания удар, является соотношение (7-9), из которого следует, что резонанс, т. е. наиболее неблагоприятный режим вибрации, наступает тогда, когда с позиций линейной механики его менее всего следовало ожидать.

Наличие на вращающемся коллекторе отдельной выступающей пластины вызывает перемещение электрощетки, которое изучается с помощью схемы, изображенной на рис. 7-2. В левой части рисунка показан момент соприкосновения выступающей пластины с электрощеткой. Очевидно, что последняя должна переместиться вверх на величину Δ_2 в течение некоторого промежутка времени T_Δ. Графики, изображающие законы перемещения электрощетки относительного коллектора, имеющего местное биение Δ_2, показаны в правой части рассматриваемого рисунка. Здесь предполагается линейное изменение ускорения $a_э$:

$$a_э = a_{э.макс}(1 - 2t/T_\Delta). \qquad (7\text{-}10)$$

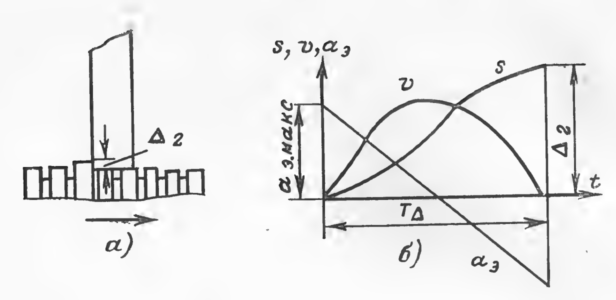


Рис. 7-2. К расчету вибрации электрощетки, вызванной выступанием отдельной коллекторной пластины.

а — схема соударения; *б* — путь (s), скорость (v) и ускорение ($a_э$) перемещающейся электрощетки [Л. 7-5].

Стрелка указывает направление вращения коллектора.

Двукратное интегрирование уравнения позволяет определить скорость и перемещение поднимающейся электрощетки:

$$v = \int_0^t a_э dt = a_{э.макс} t - a_{э.макс} t^2/2; \qquad (7\text{-}11)$$

$$S = \int_0^t v dt = a_{э.макс} t^2/2 - a_{э.макс} t^3/3t. \qquad (7\text{-}12)$$

Поскольку при $t = T_\Delta$ окажется справедливым $S = \Delta_2$, то максимальное ускорение

$$a_{э.макс} = \frac{\Delta_2}{\frac{T_\Delta^2}{2} - \frac{T_\Delta^2}{3T_\Delta}} = \frac{6\Delta_2}{T_\Delta^2}. \qquad (7\text{-}13)$$

Вопрос о том, произойдет ли нарушение контакта между коллектором и электрощеткой, решается на основе сопоставления значений действующей на нее силы инерции $F_m = \frac{Fh\gamma}{g} a_{э.макс}$ и полного нажатия P. До тех пор, пока

$$\frac{Fh\gamma}{g} a_{э.макс} \leqslant P,$$

отрыва электрощетки от коллектора не произойдет.

Из (7-13) следует, что максимальное ускорение электрощетки, столкнувшейся с выступившей пластиной, определяется шестикратной высотой превышения уровня выступившей пластины над уровнем предшествующих пластин коллектора. Поскольку величина Δ_2 является статически неопределенной и воздействовать на нее затруднительно, для практического снижения значений $a_{э.макс}$ следует увеличить T_Δ. Последний представляет собою промежуток времени, в течение которого электрощетка должна подняться на величину Δ_2. На схеме левой части рис. 7-2 соприкасающиеся пластина и электрощетка имеют прямые углы. Если эти углы удалить путем снятия фасок, то T_Δ может быть увеличено в соответствии с соотношением

$$T_\Delta = l/\pi D_к n_s, \qquad (7\text{-}14)$$

где l — длина пути, на котором происходит подъем электрощетки на величину Δ_2, мм; $D_к$ — диаметр коллектора, мм; n_s — частота вращения якоря машины, об/с.

Поскольку в выражении (7-13) T_Δ фигурирует во второй степени, возможности снижения динамических нагрузок на электрощетки путем снятия фасок на коллекторных пластинах оказываются значительными.

В основе изложенного о поведении электрощетки при соприкосновении с выступившей коллекторной пластиной лежали кинематические представления. Они позволили оценить влияние используемого в практике эксплуатации коллекторных машин способа нормализации режима работы скользящего контакта путем снятия фасок на коллекторных пластинах. Однако описанный подход к решению рассматриваемой задачи не отражает всего комплекса явлений, происходящих при соприкосновении электрощетки с выступающей пластиной. Значительную роль при этом играют упругопластические свойства материалов, из которых изготовлены соприкасающиеся тела.

В [Л. 5-7] приведена формула, связывающая исследуемые величины,

$$n = \frac{\alpha}{60} \sqrt{\frac{pg}{\Delta_2 \gamma h}}, \qquad (7\text{-}15)$$

где α — величина, зависящая от геометрических размеров электрощетки, зазора, с которым она помещена в обойму щеткодержателя, давления на нее, коэффициентов Пуассона и модуля упругости первого рода электрощеточного материала и коллекторной меди; p, g, γ, h — те же, что и в формуле (7-5); Δ_2 — превышение уровня выступающей коллекторной пластины над предшествующей (рис. 7-2).

Формулу (7-15) можно исследовать так же, как это было сделано с формулой (7-7) на рис. 7-1, и рассчитать допустимую величину выступания отдельной коллекторной пластины. Однако в практике подобных расчетов не производят, а стремятся к тому, чтобы величина выступания этой пластины не превышала некоторых норм, установленных опытным путем. По данным [Л. 7-1] допустимая величина выступания пластины коллектора не должна превышать следующих значений:

При частоте вращения коллектора, об/мин	до 3 000	до 5 000	до 8 000	до 12 000	до 16 000	до 20 000
Допустимое выступание, мкм	6	5	4	3	2	1

Зарубежные авторы ограничивают рассматриваемую величину значением 2,5 мкм [Л. 7-3]. Еще более жесткие требования к нормированию значений Δ_2 для быстроходных машин изложены оте-

чественными авторами в [Л. 5-7]. В последнем источнике допустимые значения Δ_2 оцениваются следующим образом:

При частоте вращения якоря, об/мин	10 000	50 000	100 000
Значение Δ_2, мкм	0,5	0,02	0,005

Приведенные выкладки относительно эксцентриситета Δ_1 и местного биения Δ_2 применимы к работе электрических машин в наземных условиях при нормальном атмосферном давлении. Рассмотрение аналогичных вопросов, дополненное указаниями о поведении элементов скользящего контакта электрических машин, эксплуатируемых в глубоком вакууме, содержится в [Л. 7-6 и 7-7], где отмечается, что благодаря происходящему в вакууме возрастанию значений коэффициента трения электрощетки о коллектор и стенки обоймы щеткодержателя перемещения электрощетки затрудняются. Благодаря отмеченному обстоятельству для обеспечения безотрывной работы элементов скользящего контакта приходится снижать допустимые значения Δ_1 и Δ_2.

Рассмотренные причины ухудшения нормального взаимодействия между элементами электрического скользящего контакта обусловливались нарушениями макрогеометрии поверхности скольжения коллектора. Вне зависимости от них эта поверхность может иметь на себе микрогеометрические нарушения, причина появления которых может быть двоякой. У нового, еще не работавшего коллектора микрогеометрия поверхности определяется способом и режимом механической обработки, родом примененного режущего инструмента и свойствами обрабатываемого материала. Микрогеометрия рабочей поверхности коллектора после эксплуатации зависит от свойств материалов контактирующих элементов, величины давления на электрощетку, токовой нагрузки, состава окружающей среды и других факторов.

В соответствии с ГОСТ 2789-59 микрогеометрия поверхности после механической обработки оценивается 14 классами. В практике отечественного электромашиностроения механическую обработку поверхности скольжения коллектора принято доводить до чистоты $\nabla 6$—$\nabla 7$. Подобную чистоту получают после обтачивания коллектора резцом из твердого сплава и последующего кратковременного шлифования его шкуркой. Если шлифование осуществить специальными абразивными брусками, разработанными ВНИИАЩ совместно с Ленинградским филиалом ВНИИЭМ, то чистота поверхности повысится до $\nabla 7$—$\nabla 8$; при использовании алмазного режущего инструмента класс чистоты составит $\nabla 8$—$\nabla 9$.

В процессе последующей эксплуатации степень чистоты поверхности скольжения, приданная при первоначальной обработке, может и не сохраниться. В одних случаях при нормальной работе скользящего контакта после образования слоя политуры степень чистоты несколько повышается. В других — при проявлении абразивных свойств электрощеток степень чистоты снижается. Амплитудная и частотная характеристики вибрации электрощеток, вызванной микрогеометрическими нарушениями профиля коллектора, определяются расположением этих нарушений по его рабочей поверхности и могут быть проанализированы методами, описанными ранее. Принципиально иными средствами приходится исследовать вибрации электрощеток, вызванные особыми фрикционными свойствами поверхности скольжения коллекторов. Эти вибрации создают тангенциальную составляющую перемещения электрощетки по схеме, подробно рассмотренной в [Л. 1-4]. Описываемые перемещения происходят по законам теории фрикционных релаксационных (т. е. обусловленных трением, разрывных) автоколебаний, которая указывает пути управления ими. Для рассматриваемого случая их возникновения наибольший интерес представляет воздействие на фрикционную характеристику находящихся во взаимодействии элементов контакта. Общие закономерности изменения этой характеристики и способы влияния на нее подробно рассмотрены в гл. 4. Пользуясь описанными там методами снижения значений μ, удается устранить возникшие автоколебания электрощеток и тем самым предотвратить возможность их повреждения.

Рассмотренные здесь случаи нарушения нормального взаимодействия элементов скользящего контакта имели своей непосредственной причиной различные процессы и явления, происходившие в контактной зоне. Аналогичные нарушения могут иметь причиной процессы, происходящие вне зоны контакта. Подобные ситуации возникают благодаря действию центробежных сил и в случае, когда возмущающие воздействия поступают от посторонних источников. Центробежные силы проявляют себя двояким образом; при удовлетворительной динамической балансировке вращающейся части электрической машины под их воздействием происходят упругие деформации вала и деталей коллектора и выбираются зазоры в подшипниках. В результате первоначально правильная форма поверхности скольжения коллектора с относительно небольшими неровностями при возрастании частоты вращения может приобрести вид синусоиды, амплитуды которой изменяются пропорционально *n*. Экспериментальное изучение процесса возникновения вибрации под действием центробежных сил показывает, что процесс развивается так, будто система приобретает эксцентриситет и для каждой электрической машины существует своя частота вращения, при превышении которой за счет действия центробежных сил полностью выбирается радиальный зазор в подшипниках. Только за счет указанных причин эксцентриситет работающего коллектора может удвоиться по сравнению с допустимой величиной, измеряемой в статическом состоянии [Л. 7-8].

При наличии небаланса во вращающейся части электрической машины в системе развивается возмущающее усилие. С целью снижения вибраций, вызываемых этим усилием, в СССР действует ГОСТ 12327-66, нормирующий допустимую остаточную неуравновешенность роторов электрических машин. Упомянутый ГОСТ распространяется на машины общего и специального назначения *, роторы которых имеют массу 0,01—1 000 *кг* при рабочей частоте вращения до 30 000 об/мин. Этим ГОСТ устанавливаются три класса точности уравновешивания: нулевой, первый и второй. Удельная остаточная неуравновешенность роторов электрических машин, условно отнесенная к их центру тяжести, не должна превышать предельных величин, указанных на рис. 7-3. Для роторов с рабочей

* ГОСТ 123727-66 не распространяется на автотракторные электрические машины по ГОСТ 3940-57 и на крановые и металлургические электродвигатели по ГОСТ 184-61 и ГОСТ 185-63 и их модификации.

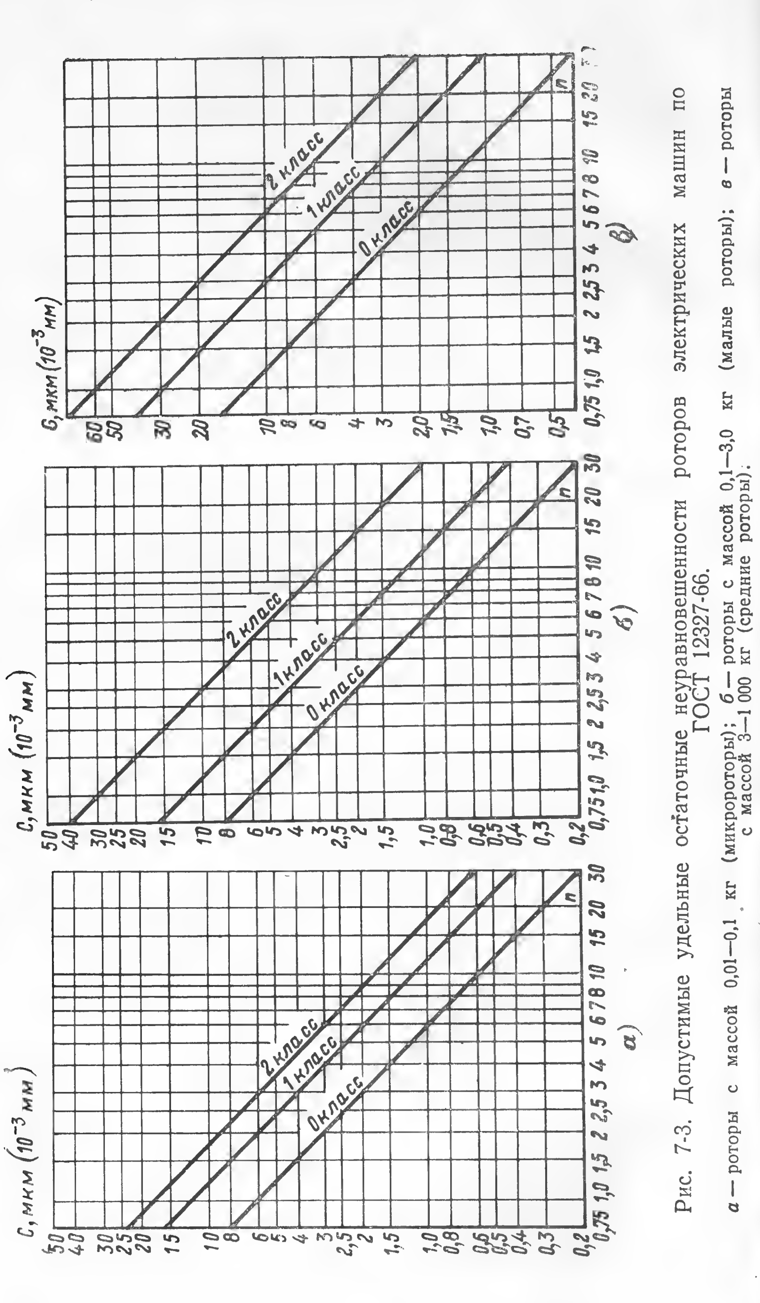


Рис. 7-3. Допустимые удельные остаточные неуравновешенности роторов электрических машин по ГОСТ 12327-66.

а — роторы с массой 0,01—0,1 кг (микророторы); *б* — роторы с массой 0,1—3,0 кг (малые роторы); *в* — роторы с массой 3—1 000 кг (средние роторы).

частотой вращения менее 750 об/мин допустимые удельные остаточные неуравновешенности определяются по формуле

$$e_n = e\,750/n,$$

где e — допустимая удельная остаточная неуравновешенность, определенная по графикам рис. 7-3 для соответствующих роторов при $n=750$ об/мин.

Эффективность произведенной балансировки вращающихся частей электрических машин определяется по величине их вибраций.

Таблица 7-5

Оценка состояния электрических машин по удвоенной амплитуде колебаний (по вибрациям), мкм

Группа машин	Частота вращения, об/мин	Оценка состояния: отличное	хорошее	допустимое	Примечания
Мощностью свыше 100 кВт	500	—	100	200	
	600	—	140	160	
	750	—	100	120	
	1 000	40	70	100	
	1 500	30	60	90	
Машины до 100 кВт	1 000	10	30	50	
	1 500	10	30	50	
Все машины	3 000	10	30	50	
	4 000	—	—	40	
	5 000	—	—	30	
Гидрогенераторы	До 187,5 вкл.	—	—	180	ГОСТ 5616-63
	До 375 вкл.	—	—	120	
	До 750 вкл.	—	—	100	
Турбогенераторы	3 000	—	—	50	ГОСТ 533-51
Компенсаторы синхронные	750	—	—	80	ГОСТ 609-66
	1 000	—	—	80	

Последние оцениваются путем измерения удвоенной амплитуды колебаний машины, производимого по одному из двух следующих способов: при измерении вибрации машины с горизонтально расположенной осью определяют составляющие по трем взаимно перпендикулярным направлениям — продольному, поперечному и вертикальному. Первые две составляющие вибраций измеряют на уровне оси вала. При обследовании машин с вертикальной осью составляющие вибрации измеряют по двум взаимно перпендикулярным направлениям: в горизонтальной плоскости и в вертикальном направлении. Измеренные описанными способами вибрации электрических машин в практике отечественного электромашиностроения принято оценивать так, как это указано в табл. 7-5.

Влияние на работу элементов скользящего контакта посторонних источников возникновения вибраций иллюстрируется осциллограммами рис. 7-4. Эти осциллограммы показывают, как изменяется удельное давление со стороны нажимного пальца щеткодержателя на электрощетку при отсутствии внешних вибраций и при возбуждении таковых с разными частотами. Если учесть, что в описываемых опытах приложенное удельное давление к электрощетке составляло $p=200$ гПа (гс/см²), то в результате при возникновении вибраций в отдельные моменты оно снижалось до 40—50 гПа (гс/см²).

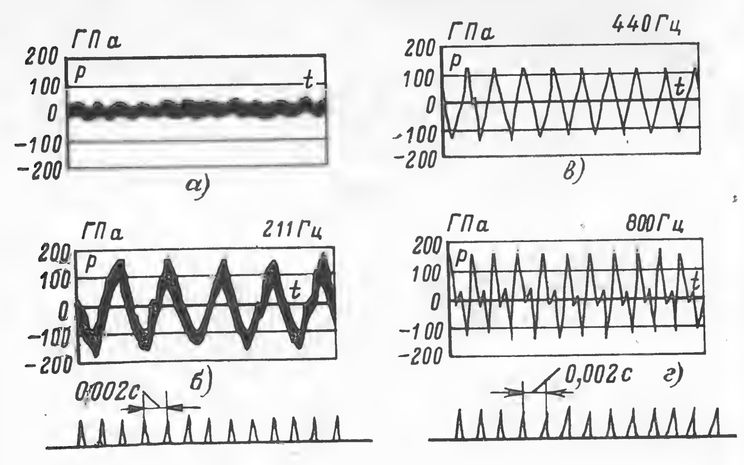


Рис. 7-4. Изменение удельного давления на электрощетку при отсутствии внешних вибраций (*а*) и при различной частоте этих вибраций (*б*, *в*, *г*) [Л. 7-9].

Качественная и количественная оценка влияния механических факторов на различные характеристики совместной работы элементов электрического скользящего контакта достаточно подробно освещалась в гл. 4—6. Здесь уместно отметить, что поскольку в реальных условиях эксплуатации обычно действует не одна, а несколько причин, вызывающих вибрации, то характеристика последних бывает представленной спектром частот. В составе этого спектра могут находиться колебания, воспринимаемые человеческим ухом как звуковые. Факт существования зависимости между вибрациями электрощетки, возникающими звуками и прохождением тока через контакт хорошо иллюстрируется рис. 7-5. Верхняя осциллограмма рисунка показывает изменение тока в набегающей части электрощетки в случае, когда ее колебания вызваны эксцентриситетом контактного кольца. Период колебаний $T=7{,}1\times10^{-4}$ с; звукового эффекта в данном режиме зафиксировано не было. На осциллограммах рис. 7-5,*б* и *в* рассматриваемого рисунка показаны изменения тока в набегающей части электрощетки, когда процесс сопровождался свистом и шумом. В первом случае период колебаний составлял $T=3{,}1\cdot10^{-4}$ с, а во втором $T=1{,}4\cdot10^{-4}$ с.

Наблюдаемые изменения характера осциллограмм и слышимых звуков вызваны соответствующими изменениями характера вибраций электрощеток [Л. 7-10]. Дальнейшие исследования позволили автору упомянутой работы установить связь между звуковыми явлениями и значением коэффициента трения в скользящем контакте: при $\mu<0{,}2$ звуки не фиксируются, при $\mu>0{,}3$ они проявляются в виде свиста, при $\mu>0{,}6$ воспринимаются как шум. Последние данные относятся главным образом к колебаниям, вызванным тангенциальными перемещениями электрощетки.

Интересное замечание о влиянии свойств электрощеточных материалов на уровень шума содержится в [Л. 7-11], где сказано, что

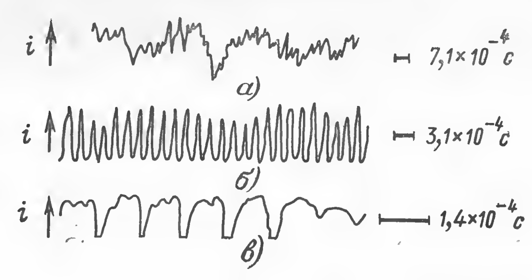


Рис. 7-5. Осциллограмма тока в набегающей части электрощетки при отсутствии звуков (*а*), при наличии свиста (*б*) и при наличии шума (*в*).

при одинаковом исходном сырье этот уровень оказывается связанным со степенью графитации. В [Л. 7-12] описаны экспериментальные данные об общем уровне и спектральном составе шумов, образуемых щетками различных марок, работающих на реальных электрических машинах. Зафиксированные частоты шумов расположились в интервале 1 000—3 000 Гц.

Описанные причины возникновения щеточных шумов указывают на возможные способы их устранения. Основным из них является качественная обработка рабочих поверхностей скольжения коллекторов и контактных колец, обеспечивающая минимальные эксцентричность, волнистость, шероховатость и другие нарушения их рельефа. Положительные результаты могут быть достигнуты также путем снижения окружной скорости на рабочей поверхности, применением мягких электрощеток, уменьшением трения их о стенки обоймы щеткодержателя и принятием других мер, снижающих вибрации.

Еще одним следствием вибраций электрощеток и обусловленных ими изменений режима прохождения тока через скользящий контакт и искрением является возникновение электромагнитных колебаний. Последние оказывают отрицательное влияние на работу находящихся поблизости радиоприемных установок, создавая для них помехи. Уровень радиопомех под электрощетками различной полярности является различным. Благодаря детектирующему дей-

ствию слоя политуры уровень помех под катодно-поляризованной электрощеткой примерно на один порядок выше, чем под электрощеткой другой полярности. Решающая роль в этом явлении слоя политуры подтверждается тем, что при хромировании медного коллектора уровни радиопомех под электрощетками различной полярности сравниваются [Л. 7-13]. Там же содержится информация о некоторых других факторах, влияющих на радиопомехи, согласно которой их уровень уменьшается вместе с контактным сопротивлением, температурой и частотой вращения. Факторами, действующими в сторону повышения уровня радиопомех, являются пониженная влажность, высотная атмосфера и все те показатели состояния рабочей поверхности коллектора, которые способствуют возникновению вибраций. В самом общем случае следует полагать, что для предотвращения радиопомех необходимо создать такие условия прохождения тока через скользящий контакт, при которых будет обеспечено соблюдение условия $di/dt \longrightarrow 0$. Для предотвращения возникновения радиопомех применение конструктивных мер, способствующих обеспечению приведенного равенства, является более важным, чем применение индуктивных или емкостных фильтров. К числу конструктивных мер относится образование скользящего контакта с помощью нескольких параллельно подключенных электрощеток, создание монолитного коллектора, применение подшипников высокого класса точности и использование других средств предотвращения вибраций электрощеток и искрения в контакте. Трудности в разработке упомянутых средств возрастают вместе с ростом окружной скорости на рабочей поверхности скольжения контакта. Имеются сведения о том, что для решения рассматриваемой задачи на контактных кольцах турбореактивных двигателей, где окружная скорость на поверхности скольжения достигает 150 м/с, были использованы электрощетки из волокнистого молибдена. Этот материал при хорошей электрической проводимости обладает упругостью, достаточной для поглощения энергии соударений электрощетки с кольцом и демпфирования вибраций [Л. 1-9].

Отмеченная здесь возможность снижения радиопомех за счет использования электрощеточных материалов с соответствующими свойствами является частью общей задачи о взаимосвязи между составом этих материалов и вибрационными свойствами изготовленных из них электрощеток. Решением этой задачи занимался ряд исследователей. В частности, автору в [Л. 1-4] удалось показать, что склонность к вибрациям возрастает по мере того, как в составе электрощеточного материала снижается содержание графита и повышается содержание сажи. Дальнейшие исследования позволили распространить аналогичный вывод на металлографитные электрощеточные материалы, склонность к вибрациям у которых оказалась зависящей от соотношения входящих в их состав порошков графита и меди. Качественная оценка описываемой общей закономерности изменения вибрационных свойств электрощеточных материалов достаточно хорошо интерпретируется кривыми H и $\sigma_п$, показанными на рис. 1-2. Подобное заключение подтверждается также опытами по определению коэффициента неустойчивости скользящего контакта, описанными в [Л. 5-7].

ГЛАВА ВОСЬМАЯ

ОПТИМАЛЬНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ СКОЛЬЗЯЩЕГО КОНТАКТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Изучение характеристик и свойств электрического скользящего контакта и выявление общих закономерностей их формирования позволяют перейти к рассмотрению вопросов, относящихся к эксплуатации скользящего контакта непосредственно на электрических машинах. Одним из первых среди них является вопрос о выборе режима работы контакта. Основными показателями, определяющими режим работы скользящего контакта электрических машин, являются окружная скорость на поверхности скольжения коллектора или контактного кольца v, удельное нажатие электрощетки на эту поверхность p и плотность тока в скользящем контакте j. Значения трех перечисленных показателей для конкретной электрической машины определяются в процессе ее расчета и увязываются с соответствующими значениями, содержащимися в технической документации на электрощеточные материалы. При этом, естественно, учитываются данные эксплуатации ранее изготовленных электрических машин, личный опыт расчетчика и другая, имеющаяся в его распоряжении информация. К сожалению среди этой информации не содержится сведений о том, в какой мере выбранный режим является оптимальным и нет ли возможности для его последующего усовершенствования. Между тем накопилось достаточное количество данных, позволяющих произвести аналитическое исследование параметров, определяющих режим работы скользящего контакта и показывающих, что практикуемые способы выбора величин этих параметров не всегда создают оптимальные условия для работы контактных элементов. С целью подтверждения этого заключения вычислим величину полных потерь в электрическом скользящем контакте P, которая представляет собой сумму механических потерь на трение $\Delta P_м$ и электрических потерь $\Delta P_э$. В самом общем случае искомая величина определяется с помощью известной формулы

$$P = \Delta P_м + \Delta P_э = 9{,}81 pF\mu v + 2\Delta UI, \qquad (8\text{-}1)$$

где p — удельное давление в контактной зоне электрощетки, 10^5 Па (кгс/см²); F — площадь контактной по-

верхности всех установленных на машине электрощеток, см²; μ — коэффициент трения электрощеток о поверхность скольжения; v — окружная скорость поверхности скольжения, м/с; $2\Delta U$ — переходное падение напряжения на пару электрощеток положительной и отрицательной полярности, В; I — ток, протекающий через контакт, А.

Если при рассмотрении учесть, что в условиях использования скользящего контакта на электрических машинах всегда справедливо соотношение

$$F = 2I/j, \tag{8-2}$$

где j — кажущаяся плотность тока в зоне контакта, то формулу (8-1) можно представить в виде

$$P = 2\cdot 9{,}81 p\mu v \frac{I}{j} + 2\Delta U I, \tag{8-3}$$

Для последующего анализа (8-3) привлечем полученные ранее выражения (3-6) и (4-2)

$$2\Delta U = A + Bj; \tag{3-6}$$

$$\mu = C - Dv, \tag{4-2}$$

где A, B, C и D — постоянные, зависящие от марки электрощеточного материала (табл. 3-1 и 4-1).

Использование двух последних выражений позволяет переписать (8-3) в новом виде:

$$P = 2\cdot 9{,}81 pv(C - Dv)\frac{I}{j} + (A + Bj) I. \tag{8-4}$$

Поскольку для применяемой марки электрощеток значения A, B, C и D являются заданными, а I и j связаны между собой соотношением (8-2), полные потери в скользящем контакте можно рассматривать как функцию трех переменных:

$$P = \varphi(p, v, j).$$

Влияние каждой из переменных на величину P можно выявить путем аналитического исследования (8-4). Для этого дважды продифференцируем ее по каждой из трех переменных и выявим условия существования для нее экстремальных значений:

$$\frac{\partial P}{\partial p} = 2\cdot 9{,}81 v(C - Dv)\frac{I}{j}; \tag{8-5}$$

$$\frac{\partial^2 P}{\partial p^2} = 0; \tag{8-6}$$

$$\frac{\partial P}{\partial v} = 2\cdot 9{,}81 p\frac{I}{j}(C - Dv); \tag{8-7}$$

$$\frac{\partial^2 P}{\partial v^2} = -4\cdot 9{,}81 p\frac{I}{j}D; \tag{8-8}$$

$$\frac{\partial P}{\partial j} = -\frac{2\cdot 9{,}81 pv(C - Dv) I}{j^2} + BI; \tag{8-9}$$

$$\frac{\partial^2 P}{\partial j^2} = \frac{4\cdot 9{,}81 pv(C - Dv) I}{j^3}. \tag{8-10}$$

Из рассмотрения (8-5) и (8-6) следует, что влияние удельного давления p на величину полных потерь является однозначным: по мере увеличения p значение P монотонно возрастает. Очевидно, что в условиях эксплуатации необходимо стремиться к выбору возможно меньших значений нажатия на электрощетки. Пределом здесь являются значения, при которых может наступить нарушение механического взаимодействия между элементами контакта.

Принципиально по-другому проявляет себя влияние на P окружной скорости v и плотности тока j. Поскольку, как это следует из (8-8), $\partial^2 P/\partial v^2 < 0$, то при соблюдении равенства

$$v = C/2D, \tag{8-11}$$

обращающего первую производную (8-7) в нуль, рассматриваемая функция будет иметь максимум. При дифференцировании по j первая производная (8-9) обратится в нуль в случае, когда

$$j = \sqrt{\frac{2\cdot 9{,}81 pv(C - Dv)}{B}}. \tag{8-12}$$

Поскольку для рассматриваемой задачи всегда будет соблюдаться соотношение $C > Dv$, подстановка j из (8-12) в выражение для второй производной (8-10) всегда будет давать $\partial^2 P/\partial j^2 > 0$. Следовательно, исследуемая функция в данном случае будет иметь минимум.

Графическая интерпретация произведенных выкладок хорошо иллюстрируется рис. 8-1—8-3. Первый из них иллюстрирует наличие максимумов в кривой полных потерь в зависимости от v, второй показывает, как располагаются точки минимума этих потерь при различных

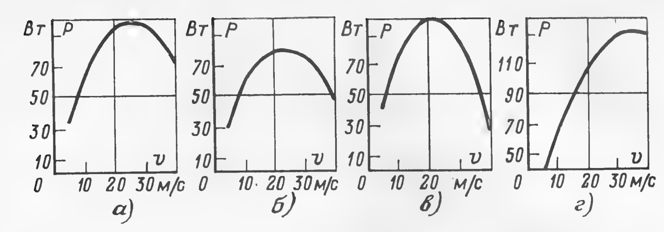


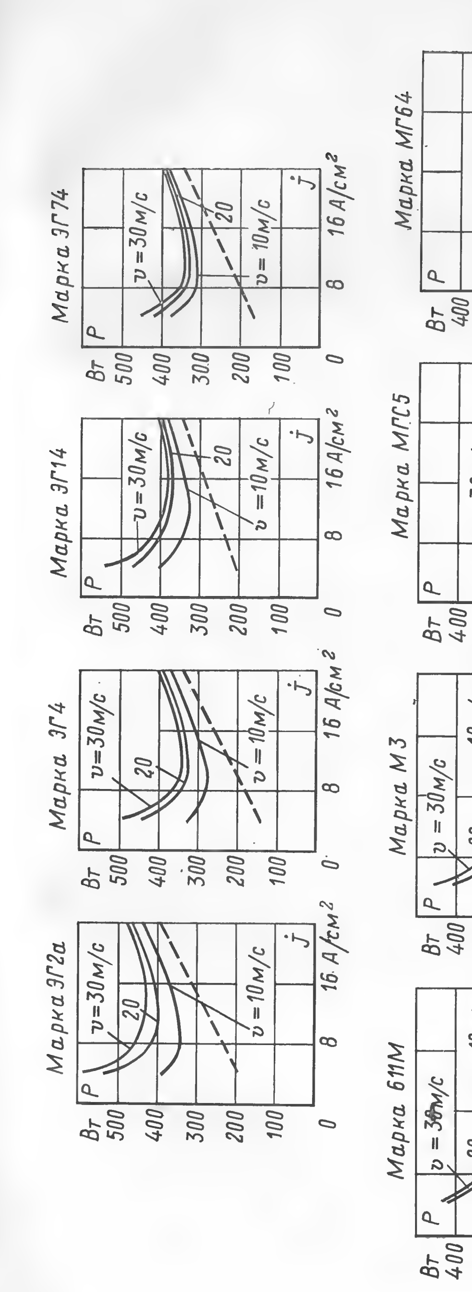
Рис. 8-1. Зависимость полных потерь в скользящем контакте электрической машины заданной мощности от окружной скорости коллектора при использовании электрощеток марок 611М (*а*), МГ64 (*б*), ЭГ74 (*в*) и ЭГ2А (*г*)

значениях j. Сопоставление рассчитанных описанным образом $v_э$ и $j_э$ со значениями окружной скорости $v_г$ и плотности тока $j_г$, рекомендованными приложением к ГОСТ 2332-63, произведено в табл. 8-1.

Таблица 8-1

Значения v и j, определяющие экстремальную величину функции полных потерь в скользящем контакте электрической машины и рекомендуемые ГОСТ 2332-63

Марка электрощеточного материала	Значения $v=v_э$, при которых функция полных потерь имеет максимум, м/с	Значения $j=j_э$, при которых функция полных потерь имеет минимум, А/см², при окружных скоростях, м/с: 10	20	30	Значения, рекомендуемые ГОСТ 2332-68: $v_г$, м/с	$j_г$, А/см²
Г3	25	12	15	15	25	10—11
ЭГ2А	35	9	11	13	45	10
ЭГ4	33	9	12	13	40	12
ЭГ8	22	10	12	13	40	10
ЭГ14	23	10	12	13	40	10—11
ЭГ74	22	10	12	12	50	10—15
611М	26	12	14	15	40	10—12
М1	29	16	19	20	25	15
М3	33	11	14	15	20	12
М6	32	13	17	18	25	15
М20	33	11	14	15	20	12
МГ	27	29	34	36	20	20
МГ2	28	25	31	32	20	20
МГ4	26	18	22	23	20	15
МГ64	24	26	30	30	25	20—25
МГС5	26	15	18	20	35	15



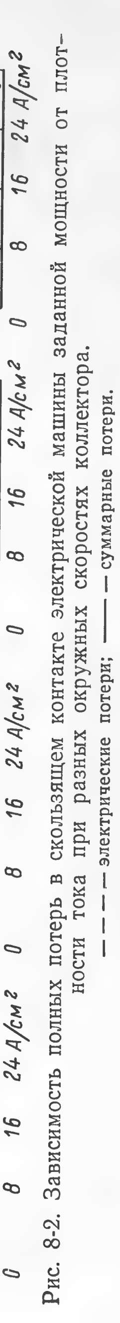


Рис. 8-2. Зависимость полных потерь в скользящем контакте электрической машины заданной мощности от плотности тока при разных окружных скоростях коллектора.
— — — электрические потери; ——— суммарные потери.

Из табл. 8-1 следует, что для большинства марок электрощеточных материалов значения $v_г$ и $v_э$ не совпадают; это благоприятно сказывается на величине полных потерь, улучшая условия работы элементов контакта. В случае, когда имеет место сходимость значений $v_г$ и $v_э$ (марки Г3, М1, МГ4), режим работы контакта оказывается менее благоприятным, поскольку при этом значения полных потерь окажутся в области максимума.

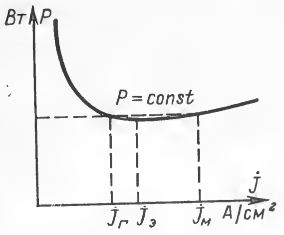


Рис. 8-3. К вопросу о соотношении значений $j_г$, $j_э$, $j_м$.

Большой практический интерес представляет сопоставление между собой цифр, приведенных в графах 3—5 и 7 табл. 8-1. Это сопоставление показывает, что во всех практически важных случаях использования скользящего контакта (имеются в виду случаи, когда $v > 20$ м/с) рекомендуемая стандартом плотность тока в контакте имеет меньшее значение, чем определенная из условия минимума полных потерь. Отмеченный факт свидетельствует о принципиальной возможности повышения плотности тока в контакте за счет уменьшения суммарной контактной площади электрощеток. Общие потери в контакте при этом снизятся. Если не стремиться к снижению этих потерь, а оставить их на уровне тех, которые имели место при $j = j_г$, то плотность тока в контакте может превысить $j_э$ и достигнуть некоторого, еще большего значения $j = j_м$. Изложенные соображения интерпретируются построениями рис. 8-3, из которых следует, что данное значение P может иметь место при двух значениях j. При этом не следует упускать из виду, что речь идет о случае, когда равенство $j = j_м$ будет достигнуто за счет соответствующего уменьшения суммарной контактной поверхности электрощеток, а не за счет каких-либо иных мер.

Изложенная методика определения оптимального режима работы скользящего контакта электрических машин базировалась на выполнении требования минимума полных контактных потерь. Поскольку при этом выявилось, что для оптимизации режима следует повысить плотность тока в контакте по сравнению с рекомендуемой ГОСТ, то возникает необходимость в дополнительном изучении последствий, к которым подобное увеличение может привести. В самом общем виде эта новая задача может быть сформулирована следующим образом: каковы возможные значения плотности тока в скользящем контакте и как возрастание этой плотности повлияет на процесс коммутации электрических машин?

Принципиальная возможность нормального функционирования электрического скользящего контакта при весьма значительных плотностях тока убедительно доказана практикой работы рельсового электрифицированного транспорта. Контактная пара «троллейный провод — лыжа пантографа» соприкасается с поверхностью, площадь которой составляет доли сантиметра, и через этот скользящий контакт длительно проходят токи до 1 520 А (электровоз Н8).

Приведенный пример заимствован из области, где условия работы элементов контакта отличны от тех, которые имеют место в электрических машинах. Что касается этих последних, то и здесь можно найти примеры достаточно интенсивного использования контакта. Так, в одной из ранних работ Е. Арнольда было показано, что хорошо пришлифованные электрощетки могут работать без искрения на гладкой поверхности контактного кольца при $j = 500$ А/см² [Л. 8-1]. В исследовании М. Е. Хейса приводится вольт-амперная характеристика электрографитированной электрощетки, снятая на контактном кольце при плотности тока, достигавшей 108 А/см². Описывая процедуру испытания, М. Хейс отмечает, что при $j = 85$ А/см² переходное падение напряжения теряло свою определенность. Контрольные приборы фиксировали возникновение явлений, которые можно было принять за интенсивное дугообразование, но дуг, видимых невооруженным глазом, при этом не наблюдалось [Л. 8-2]. В [Л. 8-3] сообщается, что если электрощетка работает на коллекторе при практически активном сопротивлении коммутируемой секции, то искрения не наблюдается при средней плотности тока 225 А/см² и плотности тока под сбегающим краем щетки 350—400 А/см². В [Л. 8-4] описывается замена жидкостного контакта униполярной машины на электрощеточный. Благодаря тщательной обработке поверхности скольжения и установке щеткодержателей, обеспечивающих изменение угла наклона медно-графитной электрощетки в соответствии с рельефом рабочей поверхности

контактного кольца, была достигнута безыскровая работа контакта в импульсном режиме при плотности тока $j=1\,500$ А/см² и окружной скорости $v=170$ м/с.

Все описанные сведения свидетельствуют о том, что сама по себе большая плотность тока в скользящем контакте не является причиной, достаточной для появления искрения. Эти сведения служат доказательством принципиальной возможности работы высоконагруженного контакта и в электрической машине. Что касается практической возможности подобной работы, то она доказывается прямыми опытами. На рис. 8-4 воспроизведены заимствованные из различных источников безыскровые зоны ряда электрических машин при последовательном уменьшении суммарной площади установленного на них комплекта электрощеток. Первый из них — рис. 8-4,*а* построен по данным испытаний на заводе «Электросила» (инж. Я. Д. Мальчик) машины типа ПН-290 (23 кВт, 110 В, 1 000 об/мин), оборудованной электрощетками марки ЭГ4 с размерами сечения 12,5×25 мм. Зона *1* снималась, когда на машине находился полный комплект электрощеток, состоящий из 16 шт.; зоны *2* и *3* были получены при уменьшении числа электрощеток до 12 и 8 шт. соответственно. Из анализа рис. 8-4 также следует, что при уменьшении числа электрощеток с 16 до 12 зона безыскровой коммутации не ухудшилась (в данном случае даже несколько улучшилась), а сам факт наличия широкой зоны при $I_я=350$ А указывает на возможность дальнейшего увеличения тока якоря. Последующее уменьшение числа щеток до восьми не изменило ширины зоны в области номинального тока машины ($I_н=210$ А), хотя плотность тока в электрощетках при этом достигла 17,5 А/см². Анализируя результаты описываемого опыта с помощью введенного ранее понятия об индексе коммутации *N* можно обнаружить, что связь между ним и числом установленных на машине электрощеток представляется следующими цифрами:

Число электрощеток на машине . . .	16	12	8
Значение индекса коммутации *N* . . .	1,00	1,25	0,81

Рисунок 8-4,*б* и *в* иллюстрирует результаты опытов **Т. Г. Амбарцумова, Е. М. Коварского и Г. И. Гершковича** на электродвигателях постоянного тока мощностью до 20 кВт с окружной скоростью на поверхности сколь-

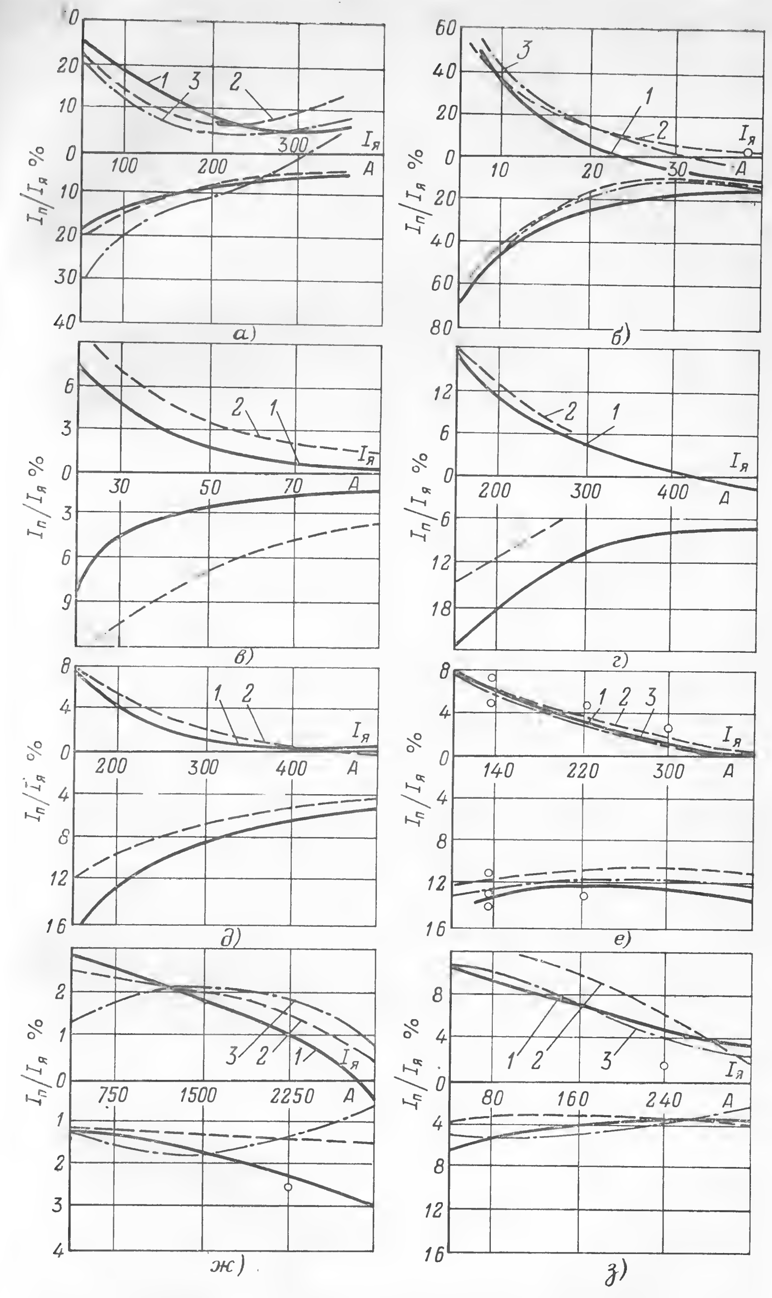


Рис. 8-4. Изменение зон безыскровой работы электрических машин при уменьшении контактной площади установленных на них электрощеток.

жения коллектора 21,3 м/с. Повышение плотности тока в контакте осуществлялось путем уменьшения площади поперечного сечения электрощеток без изменения их количества. Удельное давление на электрощетки сохранялось постоянным и составляло 270—300 гПа (гс/см²). Зоны (рис. 8-4,*б*) снимались при установке на машине электроугольных щеток марки ЭГ8. Зона *1* получена при площади сечения электрощеток на полюс машины, равной 7,2 см². Зоны *2* и *3* сняты при последовательном уменьшении этой площади до 3,6 и 1,8 см². Зоны на рис. 8-4,*в* снимались на машине, оборудованной электрощетками марки ЭГ14. При снятии зоны *1* площадь сечения электрощеток на полюс составляла 12,5 см²; зона *2* снималась после уменьшения площади до 5,75 см². Анализ описанных зон позволил их авторам заключить, что рекомендуемые стандартом плотности тока в скользящем контакте могут быть изменены в сторону увеличения [Л. 8-5].

Построения, изображенные на рис. 8-4,*г* и *д*, получены на основании экспериментов И. С. Менделеева и Б. Б. Каца [Л. 8-6]. Опыты производились на генераторе типа П92М (80 кВт, 230 В, 1 500 об/мин), снабженном электрощетками марки ЭГ74, пропитанными CdF_2 (рис. 8-4,*г*), и ЭГ4 (рис. 8-4,*д*). Электрощетки помещались в держателях радиального типа, имели сечение 2 (8×25) мм и работали при удельном давлении 200—250 гПа (гс/см²). Увеличение плотности тока в контакте производилось путем поднятия части электрощеток на каждом из бракетов. Зоны *2* двух рассматриваемых рисунков, только немного уступают зонам *1*, полученным при плотности тока в 2,5 раза большей.

На основании анализа всех обстоятельств испытаний в выводах [Л. 8-6] отмечается принципиальная возможность повышения плотности тока в скользящем контакте исследованной машины, при этом оговаривается необходимость учета некоторых дополнительных факторов, определяющих режим ее работы.

Зоны, изображенные на рис. 8-4,*е*, *ж* и *з*, построены по результатам опытов В. А. Яковенко на машинах типов П-92, МПТ-99/47 и ПН/290 соответственно. Зона *1* (рис. 8-4,*е*) снята при установке на бракете четырех щеток марки ЭГ74. Далее число электрощеток уменьшилось сначала до трех (зона *2*), а затем до двух (зона *3* [Л. 8-7]). Сопоставление зон *1* и *3* показывает, что при двукратном возрастании плотности тока в контакте их индекс коммутации остается практически без изменений, следовательно, протекание коммутационного процесса изменению не подверглось.

Рисунок 8-4,*ж* иллюстрирует, как изменялись безыскровые зоны при уменьшении числа электрощеток марки ЭГ14 с семи (зона *1*) до пяти (зона *2*) и четырех (зона *3*). Здесь темп уменьшения значения индекса коммутации существенно отставал от темпа увеличения плотности тока в контакте. Зоны *1*, *2*, *3* (рис. 8-4,*з*) сняты при последовательном уменьшении числа электрощеток на бракете с четырех до трех и двух. Из рассмотрения взаимного расположения этих зон можно заключить, что происходившее существенное возрастание плотности тока в контакте не вызвало каких-либо осложнений в протекании процесса коммутации. Все эти обстоятельства позволили В. А. Яковенко заключить, что плотность тока в контакте вновь проектируемых машин может быть значительно повышена по сравнению с нормами ГОСТ 2332-63 [Л. 8-7]. Аналогичные высказывания, основанные на соответствующих экспериментах, можно найти и у других исследователей рассматриваемого вопроса [Л. 8-14—8-17].

Анализ возможностей повышения плотности тока в скользящем контакте электрических машин не может ограничиваться изучением закономерностей изменения его коммутирующих свойств. Дополнительному рассмотрению должен быть подвергнут баланс потерь в контакте при возрастании j. Изложенные ранее основы такого рассмотрения указали на существование условий, при которых возможно снижение суммарных потерь в контакте при повышении плотности тока в нем [формулы (8-9), (8-10) и рис. 8-2]. Произведенная автором экспериментальная проверка этих условий состояла в следующем: на генераторе мощностью 12 кВт (28,5 В, 4 000—9 000 об/мин) были установлены 24 электрощетки марки МГС7, при которых плотность тока в контакте составляла $j=26{,}6$ А/см². После длительной работы и оценки теплового состояния электрощеток их число было уменьшено до 16, что привело к повышению плотности тока в контакте до 39,8 А/см². Результаты описываемого опыта, произведенного при двух значениях окружной скорости на поверхности скольжения коллектора, представлены следующими цифрами (табл. 8-2).

Таблица 8-2

Наименование показателей	При окружной скорости коллектора			
	26 м/с		57 м/с	
	24 щетки	16 щеток	24 щетки	16 щеток
Суммарная площадь сечения установленных электрощеток, см²	30,3	20,2	30,3	20,2
Плотность тока в контакте, А/см²	26,6	39,8	26,6	39,8
Зафиксированная температура перегрева электрощеток, °С:				
положительной полярности	126	119	141	126
отрицательной полярности	120	115	136	118
Степень искрения	1	1	1	1

Из рассмотрения этих цифр следует, что 50%-ное повышение плотности тока при соответствующем уменьшении площади контактной поверхности электрощеток повышения их температуры не вызвало.

Аналогичные результаты были получены при испытаниях электрощеток на машине типа ЭДР-23, производившихся на заводе «Электромашина» в Харькове (инж. Ю. П. Сердюк). Эта машина представляет собой закрытый тяговый двигатель взрывобезопасного исполнения номинальной мощностью 23 кВт (125 В, 900 об/мин). Испытания производились с электрощетками марки ЭГ14 размером 16×60×60 мм. В одном случае на машину устанавливалось две пары электрощеток, а в другом — одна пара. Тепловое состояние машины в процессе экспериментов характеризуется данными табл. 8-3, из которых следует, что двукратное повышение плотности тока при соответствующем снижении суммарной площади электрощеток не вызвало возрастания потерь в контакте. Более того, по данным табл. 8-2 можно отметить наметившуюся тенденцию к снижению этих потерь.

Идентичные результаты были получены в [Л. 8-5 и 8-6]. Авторы первой из них отмечали, что при повышении плотности тока с 6 до 16 А/см² температура электрощеток и коллекторов оставалась практически неизменной (точнее, изменилась у щеток с 65 до 71 °С, а у коллек-

Таблица 8-3

Тепловое состояние двигателя типа ЭДР-23 при установке на нем разного количества электрощеток марки ЭГ14

Рабочий режим машины					Сведения о щетках				Температура перегрева, °С			
Ток якоря, А	Ток главных полюсов, А	Напряжение, В	Частота вращения, об/мин	Зазор под главными полюсами, мм	Количество	Суммарная площадь сечения, см²	Давление на щетки, дкН (кгс)	Плотность тока, А/см²	якоря	главных полюсов	дополнительных полюсов	коллектора
190	190	125	960	2,0	4	38,4	2,9—3,2	9,9	113	86	110	87
205	205	125	850	2,0	2	19,2	2,9—3,2	21,4	105	82	111	82
200	200	125	890	1,5	4	38,4	1,8—2,0	10,4	114	98	109	99
195	195	125	895	1,5	4	38,4	1,8—2,0	10,1	110	90	106	95

Примечание. Температура двигателя определялась при его работе в часовом режиме; температура окружающей среды равнялась 18—20 °С.

торов с 63 до 66 °С). Авторы [Л. 8-6] указывали, что при возрастании плотности тока в контакте в 2,5 раза перегрев электрощеток оставался постоянным: что касается коллектора, то при уменьшении числа электрощеток, установленных на машине, с пяти до трех температура его перегрева снизилась с 56 до 33 °С.

При рассмотрении различных аспектов проблемы повышения плотности тока в скользящем контакте электрических машин отдельные авторы высказывали опасения, связанные с известным явлением неравномерного распределения тока между параллельно включенными электрощетками. Основой этих опасений являлось предположение о том, что отдельные электрощетки машин, спроектированных с соблюдением условия $j=j_г$, в действительности работают при $j \gg j_г$ и если спроектировать машину так, чтобы $j=j_м$, то при дальнейшем перераспределении тока между электрощетками их отдельные экземпляры могут оказаться чрезмерно перегруженными. Закономерности распределения тока между параллельно соединенными электрощетками изучались многими исследователями. Предложенный авторами [Л. 8-8] критерий количественной оценки рассматриваемого явления

имеет следующий вид:

$$\eta = \frac{nI_{м} - I}{I(n-1)},$$

где n — количество параллельно включенных электрощеток, шт.; I — полный ток, проходящий через все электрощетки, А; $I_{м}$ — ток, проходящий через максимально нагруженную электрощетку, А.

Если весь ток равномерно распределен между всеми параллельно соединенными электрощетками, то $I_{м}=I/n$ и

$$\eta = \frac{n\frac{I}{n} - I}{I(n-1)} = 0.$$

Если весь ток идет только через одну электрощетку, т. е. $I=I_{м}$, то

$$\eta = \frac{I(n-1)}{I(n-1)} = 1.$$

Следовательно, значения критерия неравномерности распределения тока могут изменяться в пределах 0—1, причем первому из этих значений соответствует идеально равномерное распределение тока, а второму — предельно возможное, наихудшее распределение, когда весь ток идет только через одну электрощетку. Оценив с помощью критерия неравномерности эксперименты различных авторов, изучавших распределение тока между параллельно соединенными электрощетками, можно установить, что на его численные значения можно влиять изменением воздушного давления в зоне контакта, регулировкой нажатия на электрощетки и варьированием температуры и плотности тока в контакте. Для того чтобы изменить рассматриваемый критерий в желаемом направлении, т. е. обеспечить $\eta \longrightarrow 0$, рекомендуется сверлить в теле электрощетки центральное отверстие, доходящее до ее контактной поверхности [Л. 8-8], образовывать на рабочей поверхности контактного кольца канавки [Л. 8-8, 8-18], повышать плотность тока в контакте [Л. 6-11, 8-9, 8-10], увеличивать степень его нагрева [Л. 8-10], правильно выбирать расстояние между электрощетками и надлежащим образом ориентировать их относительно поверхности скольжения контактного кольца [Л. 8-19].

Для того чтобы проиллюстрировать эффективность влияния на токораспределение плотности тока в контакте, оценим с помощью критерия η результаты опытов, описанных в [Л. 8-9]. Эти опыты производились на возбудителе типа ВТ-115-230 турбогенератора мощностью 25 мВт, эксплуатируемом на Горьковской ГРЭС. Возбудитель оборудован 12 парами электрощеток марки ЭГ74, ток через каждую из которых регистрировался с помощью 12-позиционного амперметра. Нагрузка на возбудитель ступенями возрастала так, что средняя плотность тока в контакте последовательно изменялась от 1,7 до 14,5 А/см². Значения критерия η при этом изменялись следующим образом:

Средняя плотность тока в контакте, А/см²	1,7	2,0	2,2	4,1	8,2	10,7	11,4	13,1	14,5
Значения критерия η	0,975	0,736	0,706	0,246	0,086	0,095	0,018	0,016	0,028

Аналогичная закономерность, детализированная применительно к различным образом поляризованным электрощеткам, отмечена также в [Л. 8-10]. Описываемые здесь опыты производились на экспериментальной установке, оборудованной 56 электрощетками марки ЭГ14, и повторялись многократно. В процессе их проведения был получен обширный экспериментальный материал, впоследствии обработанный методами математической статистики. Оценка однородности протекания процесса при использовании названных методов производится, как известно, с помощью коэффициента вариации:

$$V = \frac{\sigma}{\overline{X}} 100\%,$$

здесь $\overline{X}$ — среднее значение изучаемой характеристики (в данном случае плотности тока в скользящем контакте); σ — среднее квадратическое отклонение изучаемой характеристики.

Значения коэффициента вариации V при различной средней плотности тока в скользящем контакте для электрощеток различной полярности оказались следующими:

j, А/см²	4	6	8	10	12	14	16
Для катодно-поляризованной электрощетки, %	100	80	73	64	55	48	40
Для анодно-поляризованной электрощетки, %	65	52	44	38	32	28	25

Последние цифры выявили еще одно обстоятельство. Оказалось, что токораспределение под анодно-поляризованными электрощетками является более равномерным, т. е. что соотношение значений критерия неравномерности под электрощетками разной полярности имеет вид $\eta_- > h_+$. Сопоставляя последнюю запись с записями правого столбика приложения II, обнаруживаем, что токораспределение оказывается более равномерным под теми электрощетками, которые имеют меньшие значения ΔU, $\Delta h_щ$ и μ. Для объяснения подобного явления следует обратиться к тем частям текста, где рассматривались причины, вызвавшие появление полярных различий изученных характеристик скользящего контакта.

Обобщение приведенных данных о выборе режима работы скользящего контакта электрических машин свидетельствует о возможности и целесообразности повышения в нем плотности тока по сравнению с рекомендуемой ГОСТ 2332-63. Практика электромашиностроения эту возможность в ряде случаев уже реализует; конкретные примеры эксплуатации электрических машин с весьма высокой плотностью тока в скользящем контакте будут приведены в гл. 9. В числе этих примеров находятся главным образом маломощные электрические машины с ограниченным количеством установленных на них электрощеток. Подобные примеры, относящиеся к электрическим машинам средней и большой мощности, приведены в табл. 8-4, где представлены сведения об эксплуатации нескольких двигателей и генераторов постоянного тока, у которых проектное количество электрощеток было существенно уменьшено, благодаря чему плотность тока в контакте повысилась до 13,3—18,4 А/см². По свидетельству автора описываемых экспериментов каких-либо ухудшений в работе машин при этом не отмечалось, а в отдельных случаях имели место случаи улучшения состояния политуры коллекторов и уменьшение скорости их изнашивания [Л. 8-11].

Изложенное не исчерпывает всех аспектов весьма сложной проблемы повышения плотности тока в скользящем контакте электрических машин. Наряду с производимым изучением нагрева электрощеток и распределения тепла между ними и коллектором [Л. 8-12—8-17] необходимы дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования, которые позволят установить целесообразные пределы такого повышения, дадут воз-

Таблица 8-4

Данные по эксплуатации электрических машин с уменьшенным количеством установленных на них электрощеток

Назначение машины	Мощность, кВт	Напряжение, В	Частота вращения, об/мин	Характер нагрузки	Первоначальные условия		Измененные условия	
					Количество установленных щеток	Плотность тока в щетке, А/см²	Количество установленных щеток	Плотность тока в щетке, А/см²
Двигатель	1 500	260	—	Переменная	132	11,2	84	16,0
Возбудитель	43	125	3600	То же	16	13,7	12	18,4
Двигатель	4 200	240/310	167	» »	540	10,5	432	13,3
»	3 000	630	360	» »	220	7,2	140	8,8
Генератор	400	375	900	» »	28	9,7	24	11,3
»	16/27	22/33	1200	330 А	20	5,6	10	11,2

можность выявить возникающие при этом новые требования к машинам и электрощеткам, определить области применения машин и диапазон мощностей, на которые такое повышение может быть распространено, и решить целый ряд других вопросов.

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ

ОБЕСПЕЧЕНИЕ НОРМАЛЬНОЙ РАБОТЫ СКОЛЬЗЯЩЕГО КОНТАКТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Успешная эксплуатация скользящего контакта электрических машин может осуществляться только в том случае, если при выборе образующих его элементов будут учтены те многочисленные факторы, которые были рассмотрены выше. Одни из этих факторов являются универсальными в том смысле, что проявляют себя во всех случаях использования скользящего контакта, другие проявляют себя только в особых, специфических случаях эксплуатации электрических машин.

Общие технические требования, предъявляемые к электрическим машинам, не предназначенным для особых условий эксплуатации, сформулированы в ГОСТ 183-66. В разделах, относящихся к скользящему контакту, этот стандарт нормирует следующие показатели: а) в коллекторных электрических машинах, у которых передвижение щеток по коллектору не используется для регулирования частоты вращения или коэффициента мощности (как, например, в коллекторных машинах переменного тока), щетки должны находиться при всех нагрузках от холостого хода до номинальной в положении, установленном заводом — поставщиком машины; б) искрение на коллекторе электрической машины должно оцениваться по степени искрообразования под сбегающим краем щетки по шкале (классам коммутации), описанной в гл. 6; в) предельно допустимые превышения температуры коллекторов и контактных колец, измеренные с помощью термометра, при температуре газообразной охлаждающей среды +40 °С и высоте над уровнем моря не более 1 000 м не должны превышать следующих значений:

Для машин, изолированных материалами классов по ГОСТ 8865-58 . .	A	E	B	F	H
Предельные допускаемые превышения температуры, °С	60	70	80	90	100

г) электрические машины, предназначенные для продолжительного или повторно-кратковременного номинального режима работы, а следовательно, и детали их скользящего контакта должны без повреждений и остаточных деформаций выдерживать в нагретом состоянии следующие перегрузки:

машины постоянного тока (кроме возбудителей с отношением предельного напряжения к номинальному напряжению возбуждения более 1,6) и коллекторные машины переменного тока — перегрузку по току 50% в течение 1 мин;

возбудители с отношением предельного напряжения к номинальному напряжению возбуждения более 1,6—100% — перегрузку по току (от номинального тока возбуждения возбуждаемой машины) в течение 1 мин;

бесколлекторные машины переменного тока мощностью 0,6 кВт и выше, кроме машин с непосредственным охлаждением, — перегрузку по току 50% в течение 2 мин, а мощностью до 0,6 кВт в течение 1 мин.

Перенося перечисленные требования к электрическим машинам на детали узла токосъема и имея в виду необходимость увеличения срока службы последних, к элементам скользящего контакта в свою очередь предъявляют следующие требования:

а) электрощетки должны обеспечивать надежный контакт с вращающимися частями электрических машин и не вызывать нарушения этого контакта;

б) электрощетки должны надежно осуществлять коммутационный процесс машины и не вызывать искрения, связанного с переключением токов в замыкаемых секциях обмоток;

в) электрощетки должны обеспечивать нормальную эксплуатацию машин при перегрузочных режимах, предусмотренных для них технической документацией (ГОСТ и технические условия);

г) материал элементов скользящего контакта должен обладать возможно большей износоустойчивостью;

д) материал элементов контакта должен обеспечивать минимально возможные потери в нем;

е) материал элементов контакта должен обладать достаточной механической прочностью.

Общие способы удовлетворения перечисленных требований достаточно подробно освещены ранее. В последующем изложении рассматривается та часть проблемы обеспечения нормального функционирования скользящего контакта, которая связана с выбором марок электрощеток, и сделано это применительно к оборудованию, эксплуатируемому в важнейших отраслях народного хозяйства. При этом эксплуатационные характеристики контакта определяются не только свойствами материалов, из которых изготовлены электрощетки. На характеристики оказывает существенное влияние техническое состояние электрических машин, виды нагрузочных диаграмм, особенности окружающей среды и многие другие факторы. Приведя эти факторы в соответствие с описанными ранее нормами и устранив те из них, которые препятствуют нормализации работы контакта, удается создать условия, при которых эта работа будет зависеть от правильного выбора электроугольных изделий. Именно такая ситуация и положена в основу излагаемых далее рекомендаций по подбору электрощеток. Излагаемые рекомендации являются обобщением отечественного и зарубежного опыта по подбору электроугольных из-

делий к конкретным условиям их использования и по оценке обеспечиваемых ими эксплуатационных характеристик. Среди последних наиболее полно будет анализироваться характеристика скорости изнашивания электрощеток, поскольку сам факт ее получения свидетельствует о том, что большинство других показателей работы скользящего контакта удовлетворяет предъявляемым к ним требованиям.

Скорость изнашивания электрощетки $v_щ$, вычисляемая как отношение величины ее абсолютного износа $\Delta h_щ$ к промежутку времени ΔT, в течение которого этот износ образовался достаточно полно, характеризует износоустойчивость отдельного электроугольного изделия. Для целей практики подобная оценка является недостаточной; здесь необходимо располагать сведениями об износе всех используемых в тех или иных условиях электрощеток. Значения $v_щ$ всех этих электрощеток распределены по закону, описываемому уравнением (1-1). Следовательно, для оценки износа всех используемых в изучаемых условиях электроугольных изделий можно воспользоваться параметрами расположения и рассеяния соответствующего распределения. Параметром расположения распределения является величина средней скорости изнашивания электрощеток $\bar{v}_щ$; параметром рассеяния распределения служит величина среднего квадратического отклонения $\sigma^*_{vщ}$. Значение этих двух параметров позволяет вычислить весьма важную для практических целей максимально возможную величину скорости изнашивания электрощетки:

$$v_{щ.макс} = \bar{v}_щ + 3\sigma_{vщ}.$$

Последняя используется в расчетах показателей надежности и долговечности электроугольных изделий.

Щетки для машин электрических станций и подстанций. Производство электроэнергии в нашей стране сосредоточено на крупных электрических станциях, где в качестве основных агрегатов используются синхронные турбо- и гидрогенераторы. С помощью первых производится около 80% всей вырабатываемой в СССР электроэнергии. Остальные 20% приходятся на долю гидрогенераторов. Современные турбогенераторы проектируются и работают при частоте вращения 3 000 об/мин и имеют следующие основные характеристики (табл. 9-1).

* Доказательство излагаемых здесь положений о законе распределения скорости изнашивания электрощеток содержится в [Л. 1-18 и 3-1]. Описание методов проведения эксплуатационных испытаний электрощеток, дающих фактические сведения для вычисления значений $v_щ$, $\bar{v}_щ$ и $\sigma_{vщ}$, подробно изложено в [Л. 1-4].

Таблица 9-1

Тип турбогенератора	Мощность, МВт/МВ·А	Напряжение, кВ	Тип турбогенератора	Мощность, МВт/МВ·А	Напряжение, кВ
Т2-50-2	50/62,5	10,5	ТВВ-500-2	500/588	20
Т2-100-2	100/111	15,75	ТВВ-800-2	800/890	24
ТВ2-100-2	100/117,5	13,8	ТВВ-1200-2	1 200/1 370	24
ТВ2-150-2	150/167	18	ТГВ-200	200/235	13,75
ТВФ-60-2	60/75	10,5	ТГВ-300	300/353	20
ТВФ-100-2	100/117,5	10,5	ТГВ-500	500/588	20
ТВВ-165-2	150/176	18	ТВМ-300	300/353	20
ТВВ-200-2	200/235	15,75	ТВМ-500	500/588	36,75
ТВВ-320-2	300/353	20			

Изготовленные в последние годы уникальные гидрогенераторы характеризуются следующими основными показателями (табл. 9-2):

Таблица 9-2

Название ГЭС	Мощность генератора, МВт/МВ·А	Частота вращения, об/мин
Волжская им. В. И. Ленина	105/123,5	68,2
Братская	225/264,7	125
Ингурская	260/306	250
Красноярская	500/590	93,8
Саяно-Шушенская (проект)	650/—	—

В схеме возбуждения турбо- и гидрогенераторов используется скользящий контакт типа «электрощетка — контактное кольцо», принципиальная особенность которого состоит в том, что в нем отсутствуют процессы коммутации и на каждом отдельном кольце работают комплекты электрощеток только одной полярности. Помимо отмеченного, работа скользящего контакта в рассматриваемых условиях имеет еще другие специфические особенности. Одна из них определяется весьма значительной окружной скоростью на поверхности скольжения контактных колец турбогенераторов, которые по условиям прочности приходится изготавливать из стальных поковок. Другая особенность состоит во все возрастающем

количестве электрощеток, устанавливаемых на отдельном кольце. Это количество на современных турбогенераторах мощностью 300—500 МВт, имеющих токи возбуждения 3—5 тыс. А, доходит соответственно до 40—65 штук, и вопрос о токораспределении между таким числом параллельно соединенных электрощеток приобретает первостепенное значение.

Для обеспечения удовлетворительной работы узла токосъема в специфических условиях использования его на мощных синхронных генераторах различными зарубежными фирмами предложены электрощеточные материалы, сведения о которых приведены в табл. 9-3.

Все описанные здесь материалы относятся ко II—IV классам, т. е. не содержат металлических компонентов. В некоторые из них введены пропитывающие вещества. Так, например, материал марки HM6R образован путем пропитки материала марки HM6 небольшим количеством особого масла. В состав материала марки HM100 входит определенное количество политетрафторэтилена. Электрощетки марки EGOR получены в результате пропитки маслом материала марки EGO [Л. 9-1].

В отечественной практике задача обеспечения нормальной работы скользящего контакта турбогенераторов ранее решалась путем использования электрощеток марок 611М, ЭГ4, ЭГ14 и в отдельных случаях ЭГ74.

В последние годы применяют электрощетки новых марок 6110М и ЭГ2АФ, обладающие следующими характеристиками:

Марка электрощеток	6110М	ЭГ2АФ
Номинальная плотность тока, А/см²	15	15
Максимальная окружная скорость, м/с	90	90
Удельное нажатие, гПа (гс/см²)	170±50	170±50
Удельное электрическое сопротивление, Ом·мм²	8—28	12—35
Переходное падение напряжения, В	1,8	2,7
Коэффициент трения	0,17	0,17

Новые электрощетки устанавливаются на машинах с соблюдением следующего правила: щеткодержатели колец положительной полярности снабжаются электрощетками марки 6110М, кольца отрицательной полярности — марки ЭГ2АФ.

Оценке эксплуатационных свойств электрощеток, используемых на контактных кольцах турбогенераторов, посвящен ряд публикаций. Так, в [Л. 9-2] сообщается, что наблюдения за работой нескольких десятков турбо-

Таблица 9-3

Характеристики электрощеточных материалов, предназначенных для использования на контактных кольцах турбогенераторов

Марка материала	Классификационный индекс (табл. 1-2)	Номинальная плотность тока, А/см²	Максимально допустимая окружная скорость, м/с	Переходное падение напряжения, В	Коэффициент трения
ГДР					
G2	II Б	8	60	3,5	0,25
ЧССР					
D15	III Б	10	40	2,3	0,10—0,20
ПНР[1]					
G20	III Б	11	25	1,8—2,2	0,23
Англия					
HM6	III А	11,5	50	1,4—2,4	0,20
HM6R	III А	11,5	50	1,4—2,4	0,20
HM100	III А	11,5	60	1,4—2,4	0,15—0,20
ECOR	IV А	11,5	50	1,4—2,4	0,15—0,20
Франция[2]					
LFC3A	III А	10	45	1,4—2,3	0,12
LFC4	III А	10	35	2,3—3,0	0,12—0,20
LFC557	III А	10	75	2,3—3,0	0,12
Япония[3]					
GH530	III Б	11	60	2,0	0,26
G445	III А	10	60	1,6	0,24
ФРГ[4]					
RU5	IV А	8	80	1,8	0,20
RU7	IV А	8	90	2,5	0,15
RE80	IV А	10	50	2,0	0,19
F8B	III Б	6	55	3,3	0,10
E4647	III Б	12	40	2,3	6,17

[1] Могут использоваться также материалы марок M50, G12 и E13 (см. табл. 9-18).

[2] Могут использоваться также материалы марки EGA (см. табл. 9-22).

[3] Могут использоваться также материалы марок GH125 и GH325 (см. табл. 9-22).

[4] Могут использоваться также материалы марки A10S (см. табл. 9-14).

Таблица 9-4

Интервалы мощности турбогенераторов, МВт	Марки электрощеток	Средняя скорость изнашивания $\overline{v}_{щ}$, мм/1 000 ч эксплуатации	Среднее квадратическое отклонение $\sigma_{vщ}$
Менее 100	611М	3,0	2,4
	ЭГ4	1,5	1,4
	ЭГ14	5,5	4,9
	ЭГ74	8,7	4,9
От 100 до 200	611М	5,5	2,5
	ЭГ4	5,8	4,4
От 200 до 300	611М	10,0	—
	ЭГ4	15,0	—
	6110М	5,3	—
	ЭГ2АФ	4,0	—

генераторов отечественного и зарубежного производства показали, что параметры кривой распределения скорости изнашивания используемых на них электроугольных изделий имеют значения, указанные в табл. 9-4.

Приведенные цифры свидетельствуют о том, что скорость изнашивания связана с мощностью агрегатов и ее численные значения для изделий марок 611М и ЭГ4 возрастают пропорционально росту мощности. Очевидно, что область применения электрощеток перечисленных марок должна ограничиваться установками мощностью менее 100 МВт. Более мощные агрегаты должны комплектоваться щетками марок 6110М и ЭГ2АФ, устанавливаемых по правилу, описанному ранее. При соблюдении изложенной рекомендации обеспечивается удовлетворение всех прочих требований, предъявляемых к элементам скользящего контакта турбогенераторов.

Оценка эксплуатационных свойств электрощеток рассматриваемого назначения, используемых на электростанциях Англии содержится в [Л. 9-3]. Авторы [Л. 9-3], обследовав работу 35 турбогенераторов мощностью от 23 до 200 МВт, установили, что параметры кривых распределения скорости изнашивания четырех марок электрощеток, условно обозначенных литерами *A*, *B*, *C* и *D*, равны значениям, указанным в табл. 9-5.

В [Л. 9-1] отмечается, что средняя скорость изнашивания щеток, эксплуатируемых на контактных кольцах турбогенераторов в Англии, достигает 8,5 мм/1 000 ч.

Приведенные значения скорости изнашивания электрощеток, используемых на английских электростанциях,

Таблица 9-5

Марка электрощеток	Средняя скорость изнашивания $\overline{v}_{щ}$ мм/1 000 ч эксплуатации	Среднее квадратическое отклонение, $\sigma_{vщ}$
A (натуральнографитные)	17,0	9,0
B (то же)	6,5	2,9
C (то же)	10,0	7,3
D (электрографитированные)	6,0	3,9

находятся в противоречии с режимами эксплуатации турбогенераторов, которые должны работать непрерывно в течение весьма продолжительного периода времени. Для устранения этого противоречия в Англии предложено два способа увеличения продолжительности непрерывной работы скользящего контакта турбогенераторов. Первый из них заключается в применении сменных щеткодержателей, а второй — в применении электрощеток весьма значительной высоты [Л. 9-1]. Сменный щеткодержатель несет в себе электрощетку, предварительно притертую к профилю контактной поверхности кольца. Этот щеткодержатель устанавливается на машину взамен снимаемого с нее держателя с износившейся электрощеткой. Второй способ реализуется путем применения электрощеток, радиальный размер которых достигает 80, 100 и даже 133 мм. Ресурс таких изделий равен соответственно 65, 85 и 110 мм; естественно, что при данной износоустойчивости материала срок их службы оказывается весьма значительным. Применение электроугольных изделий со столь значительным ресурсом оказывается возможным только в том случае, когда машина оборудована соответствующими щеткодержателями. От последних требуется, чтобы оказываемое ими нажатие на электрощетки оставалось постоянным во всем интервале изменения их радиальных размеров при изнашивании. Известен также патент США № 3152274, кл. 310—247, в котором описан щеткодержатель со специальным переходным устройством, позволяющим использовать «высокие» электрощетки.

К числу возможных способов облегчения условий работы элементов скользящего контакта на контактных кольцах относятся также устройство на рабочей поверхности кольца спиральных канавок, сверление в теле

электрощеток радиальных отверстий и нанесение на их контактных поверхностях тангенциальных прорезей. Перечисленные мероприятия снижают давление воздушного клина в зоне контакта, уменьшают температуру контактирующих элементов, выравнивают распределение тока между отдельными электрощетками и уменьшают скорость их изнашивания. Для достижения последнего результата необходимо позаботиться о том, чтобы края спиральных канавок на поверхности контактного кольца были тщательно закруглены.

Подбор электроугольных изделий для контактных колец гидрогенераторов значительных трудностей не составляет. Обычно здесь используются материалы группы «А» классов III и IV, средняя скорость изнашивания которых лежит в пределах от 2,5—5,0 мм на 1 000 ч эксплуатации.

Помимо скользящего контакта «электрощетка — кольцо» в цепи возбуждения турбо- и гидрогенераторов находится еще один контакт, образованный деталями щеточно-коллекторного узла возбудителей. В отечественной промышленности в настоящее время эксплуатируются турбовозбудители разных типов (табл. 9-6).

Таблица 9-6

Тип	Мощность, кВт	Сила тока, А	Тип	Мощность, кВт	Сила тока, А
В4-40-3000	40	348	ВТ-300-3000	300	750
В4-45-3000	45	300	ВТ-360-3000	360	800
В4-50-3000	50	333	ВТ-450-3000	470	1 680
В4-75-3000	75	326	ВТ-99/47-7	970 / 4 020	1 940 / 4 100
В4-120-3000	120	520	ВТ-1500-500	1 240	2 750
В4-145-3000	145	630	ВТМ-1400-750	1 380	4 600
В4-220-3000	220	630	ВТ-1600	1 600 / 5 700	3 200 / 6 400
ВТ-170-3000	170	740			
ВТ-220-3000	220	630			

Возбудители, мощность которых не превышает 200—250 кВт, вполне удовлетворительно работают со щетками, индекс коммутации которых близок к единице (марки Г3, ЭГ4, 611М). Более мощные возбудители требуют применения электрощеток с повышенной коммутирующей способностью, например ЭГ74.

Зарубежные фирмы для аналогичной цели также рекомендуют пользоваться электроугольными изделиями, используемыми в других отраслях промышленности. Однако отдельные фирмы выделяют в своих каталогах марки, предназначенные специально для возбудителей турбогенераторов (табл. 9-7).

Таблица 9-7

Характеристики электрощеточных материалов, предназначенных для использования на турбовозбудителях

Марка материала	Классификационный индекс (табл. 1-2)	Номинальная плотность тока, А/см²	Максимально допустимая окружная скорость, м/с	Переходное падение напряжения, В	Коэффициент трения
		ГДР[1]			
G5	III Б	8	50	3,3	0,30
		Англия[2]			
HM5	III A	10,0	50	1,4—2,4	0,15—0,20
EG8866S	III A	12,0	60	2,5	0,12
		Япония			
GH50	IV B	12	55	2,4	0,20
GH4001	IV B	11	45	2,2	0,19
GH4451	IV A	9	40	1,8	0,28
		ФРГ[3]			
RE59W	IV A	12	50	2,7	0,12
E4350	IV A	12	40	2,6	0,16

[1] Могут применяться также материалы марок G7, G9, E5, E8, E13 и E14.
[2] Могут применяться также материалы марки EG16.
[3] Могут применяться также материалы марок RE54, 8618, F8B, F10, E3500, E4647.

Параметры кривой распределения скорости изнашивания электрощеток марки ЭГ4, используемых на возбудителях турбо- и гидрогенераторов отечественного производства, имеют значения, указанные в табл. 9-8.

Основным видом электрооборудования подстанций являются, как известно, трансформаторы. На многих подстанциях с целью повышения значения cos φ и поддержания напряжения сети на заданном уровне устанавливаются специальные компенсаторы реактивной мощности. Последние представляют собой синхронные машины явнополюсного типа горизонтального исполнения с воздушным и водородным охлаждением, работаю-

Таблица 9-8

Тип возбудителя	$\overline{v}_{щ}$, мм/1 000 ч эксплуатации	$\sigma_{vщ}$
Возбудители турбогенераторов		
ВТ-170-3000	1,8	0,5
ВТ-300-3000	3,0	1,2
Возбудители гидрогенераторов		
$\frac{ВВС}{19}$-12 (207 кВт)	1,2	—
В-92/30—6 (210 кВт)	0,7	—

щие в качестве генераторов реактивной мощности. Эти генераторы или, как их еще называют, синхронные компенсаторы в соответствии с ГОСТ 609-66 делятся на две категории: компенсаторы мощностью до 25 000 кВ·А (включительно), предназначенные для установки как в закрытом помещении, так и на открытом воздухе, выполняются с воздушным охлаждением. Машины большей мощности, предназначенные для эксплуатации на открытом воздухе с колебаниями температуры от —40 до +40 °С, охлаждаются водородом. К числу конструктивных особенностей мощных синхронных компенсаторов относятся встроенные в щиток опорные подшипники и выносные контактные кольца, заключенные в специальный кожух. Вентиляция, естественно, осуществляется по замкнутому циклу. Возбуждение — не зависимое от отдельного агрегата. Пуск в большинстве случаев производится от сети без дополнительных разгонных двигателей. Основные характеристики эксплуатируемых в отечественной промышленности синхронных компенсаторов приведены в табл. 9-9.

Элементы электрического скользящего контакта первых пяти из числа перечисленных типов синхронных компенсаторов работают в среде обычного воздуха. В подобных условиях подбор марки электрощеток осуществляется так же, как при решении несколько ранее описанной аналогичной задачи по отношению к контактным кольцам турбогенераторов. Только здесь вместо разнополярного комплекта электроугольных изделий марок 6110М и ЭГ2АФ применяют изделия одной марки ЭГ2АФ, устанавливая их на кольцах обеих полярностей.

Таблица 9-9

Тип и характеристика компенсатора	Тип и характеристика возбудителя	
КС5000-6; 5 000 квар; 485 А;	$\frac{ВС29,5}{21}$;	34 кВт
КС7500-6; 7 500 квар; 401 А;	$\frac{ВС34}{18}$;	50 кВт
КС15000-6; 15 000 квар; 560 А	$\frac{В54}{23}$;	80 кВт
КС15000-11; 15 000 квар; 565 А	$\frac{В54}{23}$	80 кВт
КС30000-11; 30 000 квар; 580 А	ГП150-600;	150 кВт
КСВ37500-11; 37 500 квар; 790 А	ВС74/14-6;	190/700 кВт
КСВ75000-11; 75 000 квар; 1 300 А	ГП750-750;	750/2 100 кВт

Скользящий контакт синхронных компенсаторов типов КСВ37500-11 и КСВ75000-11 работает в объеме, заполненном водородом. Особенности работы электрического контакта в водородной среде были рассмотрены ранее. Основываясь на графиках рис. 5-7,*г* и данных табл. 5-7, а также обобщая опыт эксплуатации синхронных компенсаторов с водородным охлаждением, представляется возможным дать следующие рекомендации по обеспечению их нормальной работы [Л. 5-12]: а) в камере контактных колец относительная влажность водорода должна поддерживаться в интервале 15—40%; б) контактные кольца должны изготавливаться из бронзы марки БР.АЖ9-4.

При соблюдении изложенных рекомендаций в рассматриваемых условиях могут применяться электрощетки марки ЭГ4, работающие со средней скоростью изнашивания до 5 мм/1 000 ч эксплуатации. Значительно более высокими эксплуатационными свойствами обладают созданные специально для данной цели электрощетки марки ЭГ74АФ, которые могут эксплуатироваться при номинальной плотности тока 15 А/см², максимальной окружной скорости 90 м/с и удельном нажатии 195±±15 гПа (гс/см²). Удельное электрическое сопротивление этих щеток лежит в пределах 19—38 Ом·мм²/м, а переходное падение напряжения составляет 2,5 В. Средняя скорость изнашивания изделий марки ЭГ74АФ в эксплуатации снижена до 0,6 мм за 1 000 ч. Одновре-

менно улучшились и другие показатели работы элементов скользящего контакта (износ колец, температура нагрева и др.).

За рубежом для использования в рассматриваемых условиях некоторые фирмы также выпускают специализированные электрощеточные материалы. Так, например, в ФРГ для колец синхронных компенсаторов (без указания на то, что они помещены в водородную среду) выпускают электрощетки марок А121 и В4 со следующими характеристиками:

Марка электрощеток	А121	В4
Классификационный индекс	IГ	IB
Номинальная плотность тока, А/см²	16	20
Максимальная окружная скорость, м/с	30	30
Переходное падение напряжения, В	1,6	0,6
Коэффициент трения	0,10	0,10

В Англии для эксплуатации в среде водорода выпускаются электрографитированные электрощетки марки EG206, допускающие номинальную плотность тока 11,5 А/см², максимальную окружную скорость 50 м/с и удельное нажатие 180 гПа (гс/см²). Переходное падение напряжения этих электрощеток лежит в пределах 1,4—2,4 В при коэффициенте трения менее 0,10.

Номенклатура номинальных размеров электрощеток для контактных колец турбо- и гидрогенераторов весьма немногочисленна. В соответствии с принятой на машинах отечественного производства конструкцией щеткодержателей типа ДБ здесь применяются электроугольные изделия, обладающие следующими размерами: 22×30×60, 20×32×64 и 25×32×64 мм. Электрощетки возбудителей серии В4 имеют размеры 20×30×40 мм. Для возбудителей серии ВТ используются изделия, размеры которых таковы: 20×30×40, 25×30×40 и 30×30×40 мм. Два последних размера используются также при изготовлении электрощеток для синхронных компенсаторов. Все электрощетки имеют форму прямоугольного параллелепипеда, определяемую ГОСТ 12232-66 как тип К1. Те из них, которые предназначаются для установки на мощных возбудителях серии ВТ, целесообразно изготавливать разрезными.

Щетки для электрических машин предприятий металлургической промышленности. Предприятия черной и цветной металлургии являются весьма крупными потребителями электроэнергии в общем балансе страны. Так,

к 1967 г., когда выплавка стали в СССР достигла 100 млн. т, установленная мощность электрических машин на предприятиях черной металлургии превысила 20 млн. кВт, а общее количество потребленной электроэнергии превзошло 54,4 млрд. кВт·ч. Последняя цифра составляет примерно 9,3% общего количества произведенной тогда в стране электроэнергии. Электровооруженность предприятий цветной металлургии в 1967 г. характеризовалась следующими цифрами (табл. 9-10):

Таблица 9-10

Наименование оборудования	Количество	Общая мощность, млн. кВт
Электрогенераторы	1 273	1,0
Трансформаторы	19 568	16,8
Электродвигатели	413 231	8,1
Преобразователи	11 142	5,5

Перечисленные здесь виды оборудования потребляли более 10% вырабатываемой в стране электроэнергии.

Современное предприятие черной металлургии представляет собой сложный комплекс различных производств, каждое из которых осуществляет определенные технологические процессы и производственные операции, направленные на переработку руды или агломерата в чугун, сталь и прокат. Установленная мощность электрических машин на современном крупном металлургическом комбинате достигает 2,5—3,0 млн. кВт при общем количестве этих машин, доходящем до 70 тыс. шт. Из указанного количества около 20% составляют коллекторные электрические машины постоянного тока и машины с контактными кольцами, для обеспечения нормальной работы которых необходимо одновременно установить 80—100 тыс. электрощеток. Эти электрощетки вместе с машинами, на которых они используются, рассредоточены по обширной территории металлургического предприятия, и правильная организация их эксплуатации представляет собою сложную задачу, которая на разных производствах решается по-разному.

В производстве агломерата и в коксохимическом производстве основная часть приводов работает от сети переменного тока. Исключение составляет группа двигателей, установленных на передвижных машинах коксовых

печей. Эти двигатели питаются от сети постоянного тока напряжением 220 В. Они обслуживают коксовыталкиватели, двересъемные машины, углезагрузочные вагоны и электровозы тушильных вагонов[1]. Указанные двигатели принадлежат в основном к серии крановых двигателей КПД и КПДН. Их мощность лежит в пределах 4,3—83 кВт, все они оборудуются электрощетками марки ЭГ14.

На электрооборудовании постоянного тока, используемом в доменном производстве, удовлетворительная работа узла токосъема обеспечивается применением одной-двух марок щеток. Основные генераторы преобразовательных агрегатов скиповой лебедки главного подъема (машины типов МП551-1/3, ГП-55/24-6, ГП-55/34-4, ГП-74/29-6, КП-4-4, ПВК-6-4) снабжаются электрощетками марки ЭГ14. На приводных моторах скиповых лебедок (машины типов КПД-800/447, КП-4-4, ДП-55/24-4, ДП-55/34-4) в качестве основных используются электрощетки той же марки ЭГ14 и иногда встречаются изделия марки ЭГ4. Такое же сочетание используется на приводах лебедок конусов (машины типов КПД-22/1002, ПН-400, ПН-1000, МП-800/447), вращающихся распределителей (машины типов ПН-290, КП-110/734, КПД-110/734), коксового грохота (машины типов КП-110/734, КПД-110/734, КПД-150/704) и ряда других вспомогательных механизмов системы загрузки, уборки и разливки чугуна.

Электрооборудование мартеновского производства представлено крановыми двигателями серий КПД, КПДН и ДП, имеющими следующие основные характеристики (табл. 9-11):

Таблица 9-11

Параметр	Серии двигателей	
	КПД, КПДН	ДП
Мощность, кВт	1,5—130	3—150
Частота вращения, об/мин	680—1 750	500—1 480
Рабочее напряжение, В	220, 440	110, 220
Режим работы, ПВ %	25	25, 100

Двигатели КПД и КПДМ имеют защищенное или закрытое исполнение; двигатели ДП — закрытые с изоляцией повышенной теплостойкости. Работа скользящего контакта двигателей перечисленных серий обеспечивается путем применения электрощеток марки ЭГ14. Таким образом, нормальная эксплуатация элементов узла токосъема электрических машин в рассмотренных цехах металлургических предприятий обеспечивается за счет использования весьма ограниченного количества марок электрощеточных материалов, индекс коммутации которых лежит в пределах $N=1,0\div1,8$.

[1] На новых заводах перечисленные механизмы снабжены двигателями переменного тока серий МТВ, МТКВ и МТМ.

Принципиально по-другому обстоит дело в прокатном производстве. Здесь сосредоточено до 70% всего количества эксплуатируемых на заводах черной металлургии электрических машин, причем в их число входят наиболее крупные агрегаты, единичная мощность которых превышает 10 тыс. кВт. Эти машины обслуживают прокатные станы, классифицируемые в соответствии со следующей схемой:

А — реверсивные регулируемые прокатные станы (блюминги, слябинги, рельсобалочные, крупносортные, толстолистовые, среднелистовые, универсальные, станы холодной прокатки).

Б — нереверсивные регулируемые прокатные станы (непрерывные и полунепрерывные станы — тонколистовые, полосовые, проволочные, сортовые, трубопрокатные, бандажные, холодной прокатки).

В — нереверсивные нерегулируемые прокатные станы.

а) Двухвалковые станы — непрерывные заготовочные и тонколистовые (старых типов); черновые клети сортовых и проволочных станов.

б) Трехвалковые станы — листовые и сортовые.

Работа реверсивных станов характеризуется резкими и частыми пиками нагрузки, большим числом включений (до 1 000 в час) и широким интервалом изменения скорости. Нереверсивные регулируемые станы для обеспечения оптимальных режимов прокатки требуют изменения скорости валков в пределах от 1 : 1,5 до 1 : 4. И в том и в другом случае для приведения во вращение валков необходимы значительные мощности. Перечисленные требования к приводу прокатных станов в отечественной металлургии удовлетворяются главным образом за счет применения электрических машин серии ГП, МП, ПБК и машин единой серии П.

Машины серии ГП представляют собою открытые или защищенные генераторы индивидуального питания

мощных электродвигателей главного привода и привода вспомогательных механизмов прокатных станов. Мощность машин этой серии лежит в пределах от 500 до 8 500 кВт при напряжении 250—900 В и частоте вращения 330—1 000 об/мин. Машины серии МП, изготавливаемые в открытом или защищенном исполнениях, используются в качестве электродвигателей главных и вспомогательных механизмов прокатных станов. Предельные мощности машин этой сери в одноякорном исполнении достигают 9 000 кВт при напряжении до 900 В. Примерно такими же характеристиками обладают машины серии ПБК. Они выпускаются для работы как в генераторном, так и в двигательном режимах. Изготавливаются в открытом, защищенном и закрытом исполнениях; в последнем случае имеют принудительную систему охлаждения.

Возможностью работать в генераторном и двигательном режимах обладают также и электрические машины единой серии П. Машины этой серии характеризуются высокой степенью унификации деталей и узлов, высоким вращающим и малым маховым моментами. Последнее позволяет осуществлять реверсирование с большой скоростью, что обеспечивает существенное повышение производительности реверсивных прокатных станов. Для нужд прокатного производства в серии П предназначены машины 18—26-го габаритов. Одноякорные машины этого участка серии перекрывает интервал мощности от 1 560 до 6 000 кВт при напряжении до 1 000 В. В машинах рассматриваемой серии реализован ряд оригинальных расчетных и конструктивных решений, обеспечивших достижение при их изготовлении и эксплуатации современных технических и экономических показателей. В табл. 9-12 приведены некоторые сведения об изготавливаемых отечественной промышленностью электрических машинах, предназначенных для применения в прокатных цехах металлургических предприятий.

Для обеспечения нормального функционирования скользящего контакта электрических машин прокатного производства отечественная промышленность выпускает электрощетки марок 611М, ЭГ4, ЭГ14, ЭГ20, ЭГ51, ЭГ74 и ЭГ74Л. Дать однозначные указания по поводу того, какие из перечисленных здесь марок более всего подходят к тому или иному типу электрических машин, невозможно, поскольку машина данного типа может выпол-

Пя—2

Таблица 9-1

Тип машины	Основные характеристики машины	Назначение машины
ГП-16-3000	3 000 кВт; 750 В; 375 об/мин	Генератор преобразовательного агрегата обжимного стана
ГП-20-3500	3 500 кВт, 750 В, 360 об/мин	То же
ГП-8500-375	8 500 кВт, 900 В, 375 об/мин	„ „
МП-2500-80	1 840 кВт, 750 В, 80/160 об/мин	Привод клети „дуо“ сортопрокатного стана „800“
МП-6200-80	4 560 кВт, 750 В, 80/160 об/мин	Привод клети „трио“ сортопрокатного стана „800“
МП-7000-24	5 150 кВт, 750 В, 50/120 об/мин	Привод реверсивной клети обжимного стана
2МП-16000-65	16 000 кВт, 900 В, 65/90 об/мин	Привод реверсивной клети обжимного стана
ПБК-16-17	2 047 кВт, 460 В, 50/120 об/мин	Привод рельсобалочного стана „900“
ПБК-250/145	4 560 кВт, 865 В, 70/120 об/мин	Привод реверсивной клети обжимного стана
ПБК-380/125	7 400 кВт, 860 В, 60/90 об/мин	То же
ПВК-9100/67	10 000 кВт, 1 000 В, 67/90 об/мин	„ „
П23/165-4,6	6 000 кВт, 1 000 В, 50/90 об/мин	„ „
2П25/105-4	8 000 кВт, 930 В, 50/95 об/мин	„ „

нять в технологическом процессе прокатного производства различные производственные функции, т. е. имеет различные нагрузочные диаграммы. Кроме того, техническое состояние машин не является постоянным. Сочетание перечисленных показателей с настройкой электрических и магнитных цепей машин и определяет выбор наиболее пригодной для данных условий работы марки электрощеток. При благоприятном сочетании упомянутых показателей скользящий контакт электрических машин рассматриваемого назначения способен удовлетворительно функционировать со щетками, индекс коммутации которых лежит в пределах 1—2 (марки 611М, ЭГ4, ЭГ14). При нарушении такого сочетания приходится переходить к использованию электрощеток, значения индекса коммутации которых приближаются к трем, т. е. в состав которых входит значительное количество сажи (марки ЭГ51, ЭГ74 и их модификации).

Иллюстрацией описываемого положения могут служить имеющиеся факты вполне удовлетворительной эксплуатации весьма мощных электрических машин, обслуживающих обжимные и рельсобалочные станы со щетками марок 611М и ЭГ4. Известны также случаи, когда плохо настроенные машины прокатного производства, неудовлетворительно работавшие с электрощетками марки ЭГ74, после соответствующей накладки и регулировки вполне успешно эксплуатировались со щетками марок ЭГ4 и 611М. Однако в качестве общего правила следует считать, что для применения на современных высокоиспользуемых электрических машинах прокатного производства наиболее пригодными являются электрощетки марок ЭГ51, ЭГ74 и их модификации, содержащие пропитывающие вещества (например, ЭГ74Л).

Зарубежные фирмы для прокатных и крановых электрических машин выпускают электрощетки разных марок (табл. 9-13):

Таблица 9-13

Страна	Назначение электрических машин	
	Крановые	Прокатные
Германская Демократическая Республика	G7, G9, E5, E8, E13, E14, E15	G7, G9, E5, E8, E13, E14, E23, E24, E25
Польская Народная Республика	E30	СЕГ732, СЕГ733, СЕГ734
Франция:		
фирма „Ле Карбон Лоррен"	—	EG48P, EG97, EG97B, EG98, EG98B, EG99, EG99B
Англия:		
фирма „Морган-айт"	A, AO, EG3, EG12, EG224, HM8	EG10, EG12, EG14, EG16, EG17, EG111, EG116, EG224, EG236, EG236S, EG257, EG259, EG260, HM2
Федеративная Республика Германия:		
фирма „Ринго-дорф"	RE12, RE56	RE12, RE56, RE98, 4011, 8618
фирма „Шунк и Эббе"	E1090V	E3500, E3532, E4297, F10, A10S
Япония:		
фирма „Тосибо Денко Компани"	TG310	G25R, TG221, TG308, TG401, TG404
фирма „Хитачи"	—	GH40, GH45
Фирма „Ниппон Карбон Компани"	—	EGGS2

Таблица 9-1

Характеристики электрощеточных материалов, предназначенных для использования на электрических машинах металлургической промышленности

Марка материала	Классификационный индекс (табл. 1-2)	Номинальная плотность тока, А/см²	Максимально допустимая окружная скорость, м/сек	Переходное падение напряжения, В	Коэффициент трения
СССР					
611М	IE	12	40	1,8	0,15
ЭГ4	IVA	12	40	2,2	0,16
ЭГ14	IVB	11	40	2,6	0,17
ЭГ20	IVБ	11	40	2,3	0,17
ЭГ51	IVB	12	60	2,4	0,17
ЭГ71	IVБ	11	40	2,4	—
ЭГ74	IVB	12	50	2,4	0,17
ЭГ74Л	IVB	12	60	3,2	0,25
ГДР					
G7	IIA	8	40	3,0	0,20
G9	IIIБ	8	50	3,3	0,20
E5	IV	12	40	3,0	0,25
E8	IVB	12	50	3,0	0,20
E13	IVB	12	50	3,5	0,20
E14	IVB	12	50	3,6	0,20
E15	IVB	12	50	3,3	0,20
E23	IVB	12	50	3,2	0,25
E24	IVB	12	50	3,5	0,20
E25	IVB	12	50	3,2	0,20
ПНР					
E30	IVB	10	40	2,4—3,0	0,23
E50	IVB	10	50	2,5—3,5	0,25
W50	IIБ	7	25	1,8—2,3	0,25
СЕГ733	IVB	10	40	2,40±0,5	0,25
СЕГ734	IVB	10	40	2,50±0,5	0,25
Франция					
EG97	IVB	10	50	2,3—3,0	0,12—0,20
EG97B	IVB	10	50	2,3—3,0	0,12—0,20
EG98	IVB	10	50	2,3—3,0	0,12—0,20
EG98B	IVB	10	50	2,3—3,0	0,12—0,20
EG99	IVB	10	50	2,3—3,0	0,12—0,20
EG99B	IVB	10	50	2,3—3,0	0,12—0,20
P10	IIБ	5	15	2,3—3,0	>0,20
D45	IIБ	8	20	2,3—3,0	>0,20
Англия					
EG10	IVB	9,5	30	1,4—2,4	0,10—0,15
EG12	IVB	10	50	1,4—2,4	0,15—0,20
EG14	IVB	9,5	50	1,4—2,4	<0,10
EG16	IVB	11,0	60	1,4—2,4	0,15—0,20

Марка материала	Классификационный индекс (табл. 1-2)	Номинальная плотность тока, А/см²	Максимально-допустимая окружная скорость, м/сек	Переходное падение напряжения, В	Коэффициент трения
EG17	IVB	10,0	50	1,4—2,0	0,10—0,15
EG111	IVБ	11,0	50	1,4—2,4	<0,10
EG116	IVB	11,0	50	2,4—3,6	<0,10
EG225	IVB	11,0	50	1,4—2,4	0,10—0,15
EG236	IVA	11,0	60	2,4—3,6	0,10—0,15
HM2	IIIA	10,0	50	1,4—2,4	0,10—0,15
HM8	IIIA	9,5	30	1,4—2,4	0,15—0,20
ФРГ					
RE12	IVB	12	50	2,9	0,20
RE56	IVB	12	40	2,4	0,12
RE98	IVA	12	60	2,9	0,14
4011	IVБ	12	60	2,9	0,18
8618	IVB	10	45	3,1	0,11
E2027	IVA	12	40	2,9	0,12
E3500	IVБ	12	40	3,0	0,10
E3532	IVA	12	40	2,7	0,14
E4297	IVA	12	40	2,3	0,10
A10S	IГ	16	30	0,7	0,12
F10S	IIIБ	10	30	2,7	0,18
E1090V	IVB	10	30	3,2	0,21
Япония					
G25R	IVБ	10	40	2,2	0,25
TG221	IVB	12	50	2,8	0,25
TG308	IVБ	12	35	3,1	0,25
TG310	IVB	12	50	2,3	0,25
TG401	IVB	12	35	2,8	0,25
TG404	IVB	12	40	2,8	0,25
GH40	IVB	11	45	2,2	0,20
GH45	IVB	12	50	2,2	0,20
EGGS2	IVB	12	60	2,4	0,26

Технические характеристики электрощеточных материалов отечественного и зарубежного производства, предназначенных для использования на электрооборудовании металлургической промышленности, приведены в табл. 9-14.

Из перечисленных здесь материалов изготавливаются электрощетки, наиболее распространенные фасоны и конструкции которых показаны на рис. 9-1. Размеры щеток имеют следующие значения:

Радиальные электрощетки

10×12,5×32 мм	16×25×40 мм	20×32×40 мм
10×16×32 »	16×30×40 »	25×30×40 »
12,5×25×40 »	16×32×40 »	25×32×50 »
12,5×32×40 »	20×30×40 »	30×30×40 »

Реактивные электрощетки

10×32×64 мм 12,5×32×64 мм 16×32×64 мм

Электрощетки, размер которых в тангенциальном направлении равен или превышает 12,5 мм, очень часто имеют разрезную конструкцию. Подобное мероприятие повышает коммутационные способности щеточно-коллекторного узла электрических машин (см. рис. 6-6).

Возвращаясь к рассмотрению табл. 9-3, можно установить, что значения приведенных в ней численных значений технических характеристик электрощеточных материалов, изготавливаемых в различных странах, являются весьма близкими.

Примерно в таком же соотношении находятся и эксплуатационные свойства изготовленных из этих материалов электрощеток. Как показывают многолетние наблюдения за эксплуатацией в прокатных цехах металлургических заводов электрооборудования отечественного и зарубежного производства, скорость изнашивания используемых там электрощеток зависит от марки материала, режима работы электрических машин (генераторный, двигательный) и, естественно, от их технического состояния. Исключая из рассмотрения случаи особо значительных отклонений от установленных норм технического состояния этих машин, при правильном выборе электрощеток параметры кривых распределения скорости изнашивания последних имеют вид, представленный в табл. 9-15.

Таблица 9-15

Режим работы электрических машин	Интервал изменения значений	
	$\overline{v}_{щ}$, мм/1 000 ч эксплуатации	$\sigma_{vщ}$
Генераторный	2,5—5,0	1,7—3,0
Двигательный	2,0—4,0	2,5—3,0





Рис. 9-1. Фасоны и конструкции щеток, используемых на электрических машинах металлургической промышленности.

Приведенным критериям удовлетворяет большинство электрощеток, изготавливаемых как отечественной, так и зарубежной промышленностью. Обширный фактический материал, иллюстрирующий справедливость приведенной оценки, содержится в [Л. 1-4, 3-1, 6-6].

Электроэнергетика предприятий цветной металлургии обслуживает процессы электролиза, электротермии и электрометаллургии. Первый из названных процессов для рассматриваемых в настоящей работе вопросов представляет наибольший интерес, так как именно здесь используется наибольшее количество электрощеток. Они установлены на генераторах преобразовательных агрегатов, снабжающих электролитические ванны постоянным током. Потребляемый ванной ток при электролитическом рафинировании меди лежит в пределах 2 000—15 000 А. При производстве алюминия эта величина повышается до 30 000—50 000 А. Расход электроэнергии на производство 1 т металла в первом случае (т. е. для меди) доходит до 300 кВт·ч, а во втором до 17 000—20 000 кВт·ч. Указанные параметры основных технологических процессов переработки цветных металлов определяют характеристики генераторов, используемых в качестве источника энергоснабжения ванн: они должны генерировать значительные токи. Последнее в свою очередь приводит к возрастанию общего числа устанавливаемых на машине электроугольных изделий.

В конструктивном отношении отличительных особенностей эти изделия не имеют. Они подобны изображенным на рис. 9-1. Аналогичное замечание может быть сделано и по отношению к материалам, из которых изготавливаются электрощетки рассматриваемого назначения. В отечественных и зарубежных каталогах нет указаний о специальных марках этих материалов для подобных генераторов. Обычно для них выбираются электрощетки из числа перечисленных в табл. 9-14. Сделанное замечание распространяется на генераторы электролизерных установок с напряжением более 100—120 В и не касается генераторов преобразовательных агрегатов, работающих при напряжениях до 110 В. В последних случаях машины оборудуются электрощетками, содержащими в своем составе тем большее количество меди, чем меньшим является напряжение генератора. Применительно к электрическим машинам, используемым в металлургической промышленности, описываемая схема имеет вид, приведенный в табл. 9-16.

Многие из перечисленных здесь марок материалов имеют еще одну специализированную область применения — контактные кольца синхронных и асинхронных электрических машин и одноякорных преобразователей. Подобные машины распространены в металлургической промышленности достаточно широко. В результате их обследования установлено, что они снабжены контактными кольцами, изготовленными из материалов, перечисленных в табл. 9-17.

Таблица 9-16

Страна-изготовитель электрощеток	Рекомендуемые марки электрощеток при напряжении машин, В					
	2—6	6—12	12—25	25—40	40—80	80—110
СССР	МГ1	МГ2 МГ64 МГСО	МГ64	М1 М6 МГ4 МГ6	М3 М6 М20	611М
ГДР	М8 М11	М8 М10	М8 М19	М17	Е16	Е16
ЧССР	К11	К31 К32 К43 К82 М12	К75 М18 М34	М30	К65	—
ПНР	М87 СМГ703	М78 М83	М78 М83	М78 М83	G12	G12
Англия	СМ0 СМ2 СМ25	СМ3Н	СМ5Н	СМ6 СМ9	СМ9 СМ9133	ЕС0 ЕС0101
Япония	MG32 MG34 MG36 MG38 MH32S	MG3R MG5R MG6R MG30 MG28	MG20 MG24 MG26 MK6 MK10 ML11	MG9RB MG9RB0 MG9RB MG9RB0	— —	— —
ФРГ	EN10 B425	A6 EN12 EN1500	A12 EN135 EN150 EN1500	A20S	E4350	E4350

Таблица 9-17

Материал контактного кольца	Количество электрических машин, имеющих контактные кольца из данного материала, %	
	асинхронных	синхронных
Бронза	38	10
Латунь	20	14
Медь	15	—
Сталь	15	69
Чугун	12	7
Итого	100	100

Характеристики электрощеточных материалов, предназначенных для использования на низковольтных электрических машинах постоянного тока и машинах с контактными кольцами, подробно описаны в табл. 9-18. Значения средней скорости изнашивания электрощеток, используемых на контактных кольцах, располагаются в интервале 0,5—3,5 мм/1 000 ч эксплуатации. Среднее квадратическое отклонение этой величины лежит в пределах 0,3—1,4 мм/1 000 ч эксплуатации.

Изучение поведения электрощеток на генераторах преобразовательных агрегатов электролизерных установок показывает, что наряду с использованием здесь электроугольных изделий с низкими значениями индекса коммутации (марки ЭГ4, ЭГ14) имеют место случаи, когда приходится прибегать к использованию изделий, обладающих весьма высокими коммутирующими свойствами (марка ЭГ74 и ее модификации). Необходимость в подобном мероприятии обычно возникает на машинах старых выпусков при работе их в номинальных и перегрузочных режимах. Вообще следует заметить, что работа элементов скользящего контакта на генераторах электролизерных установок обладает одной особенностью, заключающейся в следующем: при процессе электролиза в рабочем растворе происходит уменьшение содержания добываемого металла. В результате происходит увеличение внутреннего сопротивления ванн и для поддержания требуемого тока к ним приходится прикладывать во много раз большие напряжения. При добавлении в ванну новой порции электролита происходят явления, обратные только что описанным: снижается ее внутреннее сопротивление и возникает необходимость в уменьшении прикладываемого напряжения. Описываемые явления могут чередоваться достаточно быстро, и, поскольку система регулирования напряжения источника питания не является безынерционной, создаются условия для возникновения искрения под электрощетками [Л. 9-4].

Последнему способствует также неравномерное распределение тока между параллельно включенными электрощетками одного бракета, число которых на генераторах рассматриваемого назначения особенно велико (15—20 шт.).

По поводу скорости изнашивания электроугольных изделий, используемых на генераторах электролизерных установок, можно заметить, что она весьма близка к той,

Таблица 9-18

Характеристики щеточных материалов, предназначенных для использования на электрических машинах с контактными кольцами и на низковольтных электрических машинах металлургической промышленности

Марка материала	Классификационный индекс (табл. 1-2)	Номинальная плотность тока, А/см²	Максимальная окружная скорость, м/с	Удельное нажатие, гПа (гс/см²)	Удельное электросопротивление, Ом·мм²/м	Плотность, г/см³	Твердость по Шору	Переходное падение напряжения, В	Коэффициент трения	Область применения
						*СССР**				
Г3	IIIA	11	25	200—250	16	1,65	8—22**	1,8	0,17	Генераторы с большой силой тока (электролизеры) и контактные кольца асинхронных двигателей и одноякорных преобразователей
М1	IД	15	25	150—200	3,0	3,10	8—25**	1,4	0,17	Контактные кольца асинхронных генераторов, одноякорных преобразователей и асинхронных двигателей. Может применяться на генераторах напряжением 25—40 В
М3	IД	12	20	150—200	7,6	2,20	7—20**	1,6	0,16	Контактные кольца асинхронных машин и генераторы напряжением 40—80 В
М6	IД	15	25	150—200	2,8	3,00	—	1,3	0,15	Двигатели и генераторы малой мощности при напряжении 25—40—80 В
М20	IД	12	20	150—200	6,5	2,20	8—25**	1,6	0,16	То же, что М3
МГ1	IB	20	20	180—230	0,07	5,60	4—14**	0,2	0,16	Контактные кольца асинхронных двигателей и машины напряжением до 6 В

Продолжение табл. 9-18

Марка материала	Классификационный индекс (табл. 1-2)	Номинальная плотность тока, А/см²	Максимальная окружная скорость, м/с	Удельное нажатие, гПа (гс/см²)	Удельное электросопротивление, Ом·мм²/м	Плотность, г/см³	Твердость по Шору	Переходное падение напряжения, В	Коэффициент трения	Область применения
МГ2	IA	20	20	180—230	0,14	5,00	4—18**	0,4	0,17	Контактные кольца асинхронных двигателей и одноякорных преобразователей и машины постоянного тока напряжением 6—12 В
МГ4	IГ	15	20	200—250	0,90	4,20	11—25**	0,9	0,15	Контактные кольца одноякорных преобразователей, асинхронных двигателей и синхронных генераторов и машины постоянного тока напряжением 25—40 В
МГ6	IГ	18	20	200—250	0,63	4,30	—	0,7	0,16	То же, что и МГ4
МГ64	IA	20	25	150—200	0,08	5,72	5—18**	0,36	0,16	Машины напряжением 6—25 В при высокой плотности тока в электрощетках
МГСО	IA	20	20	150—200	—	6,30	—	0,17	0,14	Низковольтные машины напряжением 6—12 В
						ГДР				
Е3	IVБ	12	80	—	17	1,45	30	3,5	0,30	Медные, стальные и бронзовые контактные кольца
Е16	IB	12	40	—	32	1,55	55	2,8	0,20	То же
М6	IA	18	40	—	0,08	5,40	18***	0,60	0,20	Бронзовые контактные кольца
М7	IB	18	40	—	0,08	4,90	18***	0,70	0,20	То же
М8	IГ	16	40	—	0,12	4,40	11***	1,00	0,20	Генераторы электролитических установок напряжением от 2 до 24 В и контактные кольца из бронзы
М9	IB	20	40	—	0,09	4,90	11***	0,70	0,20	То же, что и М6

Продолжение табл. 9-18

Марка материала	Классификационный индекс (табл. 1-2)	Номинальная плотность тока, А/см²	Максимальная окружная скорость, м/с	Удельное нажатие, гПА (гс/см²)	Удельное электросопротивление, Ом·мм²/м	Плотность, г/см²	Твердость по Шору	Переходное падение напряжения, В	Коэффициент трения	Область применения
М10	IВ	20	40	—	0,18	4,10	11***	0,90	0,18	Низковольтные генераторы электролитических установок при напряжении 6—12 В
М11	IА	25	20	—	0,08	5,20	14***	0,50	0,18	То же при напряжении 2—6 В
М17	IД	14	20	—	1,40	3,40	19	1,80	0,15	То же при напряжении 25—40 В
М19	IГ	14	40	—	0,20	3,90	—	1,00	0,15	То же при напряжении 12—25 В
						ЧССР				
К11	IВ	18	20	200—250	0,07—0,17	4,95—5,15	8—14***	0,5	0,20	Низковольтные генераторы электролитических установок напряжением до 6 В и контактные кольца асинхронных двигателей
К31	IГ	15	25	200—250	0,12—0,20	4,45—4,55	9—17***	1,1	0,22	Контактные кольца и генераторы напряжением до 15 В
К32	IГ	16	25	200—250	0,13—0,28	4,15—4,35	5—10**	1,3	0,25	Низковольтные генераторы напряжением до 12 В и контактные кольца асинхронных двигателей
К43	IГ	13	30	200—250	0,40—1,20	3,50—3,70	8—13***	1,3	0,25	То же
К65	IД	15	35	200—250	2,00—8,00	2,50—2,75	6—11***	2,1	0,25	Двигатели и генераторы напряжением до 80 В
К75	IГ	12	30	180—230	0,50—1,35	3,10—3,30	8—13***	1,4	0,20	Низковольтные генераторы напряжением до 24 В, медные и бронзовые контактные кольца асинхронных двигателей
К82	IД	15	25	150—200	1,60—6,40	2,65—2,85	12—22***	2,2	0,25	Низковольтные генераторы напряжением до 15 В и игрушечные двигатели

Продолжение табл. 9-18

Марка материала	Классификационный индекс (табл. 1-2)	Номинальная плотность тока, А/см²	Максимальная окружная скорость, м/с	Удельное нажатие, гПа (гс/см²)	Удельное электросопротивление, Ом·мм²/м	Плотность, г/см³	Твердость по Шору	Переходное падение напряжения, В	Коэффициент трения	Область применения
М12	IВ	20	20	200—250	0,30—0,50	4,80	15—20	0,9—1,2	0,20—0,25	Генераторы напряжением до 12 В и медные контактные кольца асинхронных и синхронных машин
М18	IГ	20	20	200—250	0,30—0,50	4,50	18—25	0,9—1,2	0,20—0,25	Генераторы напряжением до 20—25 В, литые бронзовые кольца асинхронных двигателей, синхронных генераторов и одноякорных преобразователей
М20	IГ	15	20	200—250	0,30—0,65	4,25	18—24	0,9—1,3	0,20—0,25	Контактные кольца асинхронных двигателей
М25	IГ	15	25	200—250	0,60—1,30	3,95	19—25	1,1—1,5	0,20	Контактные кольца одноякорных преобразователей
М30	IГ	15	25	200—250	1,00—2,00	3,70	24—28	1,1—1,6	0,20	Машины напряжением до 30—40 В
М35	IГ	12	30	200—250	1,90—3,70	3,45	20—28	1,2—1,6	0,20	Машины напряжением до 25 В
						ПНР				
G12	IIБ	11	25	220	9—15	1,5—1,7	15—30	1,7—1,2	0,23	Генераторы питания гальванических ванн при напряжении 40—110 В. Применима для контактных колец из различных материалов, в том числе и для стальных колец быстроходных машин
E13	IVA	12	40	220	10—16	1,4—1,7	17—31	1,7—2,7	0,23	Контактные кольца из различных материалов, в том числе и стальные контактные кольца быстроходных машин
E17	IVБ	10	25	200	14—21	1,4—1,6	22—38	2,4—3,0	0,20	Контактные кольца асинхронных двигателей

Продолжение табл. 9-18

Марка материала	Классификационный индекс (табл. 1-2)	Номинальная плотность тока, А/см²	Максимальная окружная скорость, м/с	Удельное нажатие, гПа (гс/см²)	Удельное электросопротивление, Ом·мм²/м	Плотность, г/см³	Твердость по Шору	Переходное падение напряжения, В	Коэффициент трения	Область применения
					ПНР					
М50	IД	15	25	200	2,1—5,3	2,8—3,0	15—28	1,30—1,90	0,23	Контактные кольца из различных материалов
М68	IГ	18	20	200	1,4	3,8—4,0	12—25	0,80—1,35	0,24	Контактные кольца из стали и чугуна
М78	IВ	20	20	200	0,04—0,09	5,6—5,9	10—18	0,20—0,28	0,20	Генераторы питания гальванических ванн при напряжении 6—12—24 В и контактные кольца из различных материалов
М83	IВ	20	20	175	0,06—0,18	4,5—4,8	10—21	0,25—0,40	0,23	То же
М87	IА	20	20	175	0,04—0,09	6,2—6,4	5—12	0,20—0,40	0,20	То же, что и М78, но при напряжении 4—6 В
СМГ701	IА	20	20	180—200	0,03—0,10	—	3—10	2,75±0,5	0,20	Контактные кольца одноякорных преобразователей и асинхронных двигателей
СМГ702	IГ	13	20	200—250	1,00—2,00	—	10—20	2,40±0,5	0,25	Контактные кольца синхронных генераторов, асинхронных двигателей и одноякорных преобразователей
СМГ703	IВ	20	20	180—200	0,05—0,25	—	6—18	2,50±0,5	0,25	Контактные кольца асинхронных двигателей
СМГ704	IД	15	25	150—200	2,00—4,00	—	15—32	1,50±0,5	0,25	Контактные кольца одноякорных преобразователей и машин переменного тока
					Англия					
EG0	IVA	10,0/11,5	20	180	18	—	—	1,4—2,4	0,10—0,15	Электролизеры и контактные кольца из стали и бронзы
EG0R	IVA	—	50	180	—	—	—	1,4—2,4	0,10—0,15	Контактные кольца
EG101	IVA	8,5/11,5	20—35	180	—	—	—	1,4—2,4	0,10—0,15	То же, что EGO

Продолжение табл. 9-18

Марка материала	Классификационный индекс (табл. 1-2)	Номинальная плотность тока, А/см²	Максимальная окружная скорость, м/с	Удельное нажатие, гПа (гс/см²)	Удельное электросопротивление, Ом·мм²/м	Плотность, г/см³	Твердость по Шору	Переходное падение напряжения, В	Коэффициент трения	Область применения
СМ	IВ	15,5/23,0	20	140	0,18	—	—	0,8	0,10	Контактные кольца асинхронных двигателей
СМ0	IВ	17/23,0	20	140	0,13	—	—	0,8	0,15—0,20	Генераторы гальванических цехов
СМ1S	IА	15,5/23,0	30	140	0,30	—	—	0,8	0,10—0,15	Контактные кольца из бронзы и латуни
СМ2	IВ	15,5/23,0	30	180	0,13	—	—	0,8	0,10	Машины напряжением до 6 В
СМ3В	—	12,5/15,5	30	140	—	—	—	0,8—1,4	0,10—0,15	Контактные кольца машин переменного тока
СМ3Н	IВ	12,5/14,0	30	210	0,25	—	—	0,8	—	Генераторы напряжением до 12 В и контактные кольца
СМ5Н	IВ	11,5/14,0	—	210	0,50	—	—	0,8—1,4	0,10	Контактные кольца одноякорных преобразователей и асинхронных двигателей. Возможно использование на машинах напряжением до 30 В
СМ5В	IГ	11,5/14,0	—	210	2,50	—	—	0,8—1,4	0,10	Контактные кольца совершенно закрытых машин, особенно колец из медно-никелевого сплава
СМ6	IГ	—	30	140	3,30	—	—	1,4—2,4	0,10	То же, что и СМ2, при напряжении 25—50 В
СМ9	IД	11,0/11,5	30	140	4,00	—	—	1,4—2,4	0,10	То же, но при напряжении 40—80 В
СМ25	—	14,0/25,0	30	180	—	—	—	1,4—2,4	0,10	Контактные кольца и генераторы напряжением до 8 В
СМ9133	—	11,0/12,5	—	210	—	—	—	0,8—1,4	0,10—0,15	То же, что СМ9, но при напряжении 40—80 В

Продолжение табл. 9-18

Марка материала	Классификационный индекс (табл. 1-2)	Номинальная плотность тока, А/см^2	Максимальная окружная скорость, м/с	Удельное нажатие, гПа (гс/см^2)	Удельное электросопротивление, Ом·мм^2/м	Плотность, г/см^3	Твердость по Шору	Переходное падение напряжения, В	Коэффициент трения	Область применения
					Франция					
LFC3A	IIIA	10	45	—	20	—	20	1,4—2,3	0,12	Стальные и медные кольца турбогенераторов и кольца одноякорных преобразователей
LFC4	IIIA	10	35	—	30	—	22	2,3—3,0	0,12—0,20	Кольца одноякорных преобразователей, синхронных машин и турбогенераторов
X	IIIБ	10	15	—	20	—	56	2,3—3,0	0,20	Контактные кольца из стали при пониженных окружных скоростях
EGAD	IVБ	8/12	30	—	18	—	34	2,3—3,0	0,12—0,20	Контактные кольца одноякорных преобразователей и асинхронных двигателей
CG50	IГ	12	35	—	12—20	—	22	1,4	0,12	Контактные кольца из различных материалов
CG65	IГ	15	25	—	0,25—0,38	—	22	1,4	0,12	То же
CG65/35	IГ	15	25	—	0,26—0,34	—	15	1,4	0,12	» »
CG75	IГ	15	25	—	0,12—0,19	—	19	1,4	0,12	» »
CG2	IГ	12	15	—	8	—	26	1,4	0,12	Низковольтные генераторы и контактные кольца из бронзы при малой окружной скорости
CG3	IГ	15	15	—	4	—	27	1,4	0,12—0,20	То же
CG4	IГ	15	15	—	2	—	28	1,4	0,12—0,20	» »
OMC	IB	25/30	20	—	0,10	—	10	1,4	0,12	Контактные кольца из бронзы и низковольтные генераторы
MC79	IB	25/30	20	—	0,10	—	20	1,4	0,12	То же
MC3702	IB	25/30	25	—	0,50—0,80	—	8—12	1,4	0,12	» »

Продолжение табл. 9-18

Марка материала	Классификационный индекс (табл. 1-2)	Номинальная плотность тока, А/см^2	Максимальная окружная скорость, м/с	Удельное нажатие, гПА (гс/см^2)	Удельное электросопротивление, Ом·мм^2/м	Плотность, г/см^2	Твердость по Шору	Переходное падение напряжения, В	Коэффициент трения	Область применения
					Япония					
MH32	IB	18	30	—	0,18	—	14	0,60	0,30	Контактные кольца одноякорных преобразователей и асинхронных двигателей
MH32S	IB	18	30	—	0,19	—	15	0,60	0,30	Контактные кольца, работающие с вибрациями. Применимы также для генераторов напряжением 2—3 В
MH33	IB	15	30	—	0,24	—	14	0,80	0,15	Контактные кольца
MH33L	IB	18	35	—	0,25	—	16	0,70	0,23	То же
ML11	IД	15	30	—	2,40	3,40	17	0,50	0,18	Низковольтные генераторы напряжением до 24 В
ML13	IГ	20	30	—	0,80	3,85	16	0,36	0,16	Контактные кольца одноякорных преобразователей
ML14	IГ	20	30	—	0,40	4,20	16	0,26	0,16	То же
ML15	IГ	25	30	—	0,25	4,50	15	0,24	0,18	» »
MK6	IД	15	25	—	11	2,30	40	0,10	0,26	То же, что и MLII
MK10	IД	15	25	—	6	2,80	30	0,50	0,22	То же
G6	IIIA	10	30	100—150	12	1,70	25	1,0	0,30	Контактные кольца
TG136	IVA	9	40	100—150	12	1,60	18	2,4	0,27	То же
MG38	IB	25	15	180—250	0,08	5,8	8	0,20	0,20	Машины напряжением до 6 В
MG36	IB	25	15	180—250	0,08	5,5	8	0,20	0,20	То же
MG34	IB	25	15	180—250	0,10	4,8	8	0,25	0,20	» »
MG32	IB	25	20	180—250	0,12	4,5	8	0,30	0,20	» »

Марка материала	Классификационный индекс (табл. 1-2)	Номинальная плотность тока, А/см²	Максимальная окружная скорость, м/с	Удельное нажатие, гПа (гс/см²)	Удельное электросопротивление, Ом·мм²/м	Плотность, г/см³	Твердость по Шору	Переходное падение напряжения, В	Коэффициент трения	Область применения
MG30	IГ	20	30	180—250	0,15	4,3	13	0,30	0,22	Машины напряжением 6—12 В
MG28	IГ	20	35	180—250	0,70	3,7	20	0,40	0,24	То же
MG26	IГ	18	35	180—250	1,00	3,5	16	0,45	0,25	Машины напряжением 12—25 В
MG24	IД	—	—	150—250	1,50	3,3	18	0,50	0,25	То же
MG9RB	IД	15	30	150—250	12,00	2,7	25	0,60	0,27	Машины напряжением 25—40В
MG9RB0	IД	15	30	150—250	14,00	2,3	27	0,70	0,25	То же
MG3R	IГ	20	30	130—280	0,18	4,0	12	0,30	0,22	То же, что MG30
MG5R	IГ	18	30	130—280	0,30	3,8	13	0,35	0,25	То же
MG6R	IГ	18	35	130—280	0,50	3,3	12	0,50	0,26	» »
					ФРГ					
BN1	IIIA	10	35	180—250	9	2,25	20	2,0	0,08	Контактные кольца с плохой вентиляцией
BU10	IIIБ	8	40	180—200	20	1,75	20	2,6	0,16	Медные и бронзовые контактные кольца с плохими условиями охлаждения и для машин, работающих в химических активных средах
EN10	IA	25	30	200	0,10	5,20	30***	1,0	0,10	Машины напряжением 4—6—8 В
EN12	IB	18	25	200—250	0,12	4,80	—	0,8	0,10	Машины напряжением 6—12 В
EN19	IIIБ	20	45	200	0,10	5,20	30***	0,5	0,05	Кованые медные и твердые бронзовые контактные кольца, содержащие не более 95% меди
EN135	IГ	15	30	200	0,50	4,20	50***	0,5	0,15	Машины напряжение до 25 В

Марка материала	Классификационный индекс (табл. 1-2)	Номинальная плотность тока, А/см²	Максимальная окружная скорость, м/с	Удельное нажатие, гПа (гс/см²)	Удельное электросопротивление Ом·мм²/м	Плотность, г/см³	Твердость по Шору	Переходное падение напряжения, В	Коэффициент трения	Область применения
EN150	IГ	14	30	200	0,70	3,80	50***	1,0	0,10	Машины напряжением до 30 В
EN1500	IГ	14	30	200—250	0,65	3,85	—	1,3	0,11	Машины напряжением до 25 В
CL19	IB	20	25	200—250	0,12	5,25	—	0,7	0,07	Контактные кольца
E4350	IVA	12	40	180	15	1,60	16***	2,6	0,16	Генераторы гальванических цехов при напряжениях 40—80—110 В
A6	IB	20	30	200	0,2	4,80	12***	0,5	0,13	Машины напряжением 6—12 В
A122	IГ	16	30	200	0,3	4,10	13***	0,9	0,10	Контактные кольца одноякорных преобразователей
A20S	IД	12	30	180	2,0	3,00	—	1,3	0,13	Генераторы питания гальванических ванн
B4	IB	20	30	200	0,1	5,30	—	0,6	0,10	Контактные кольца синхронизированных асинхронных двигателей, одноякорных преобразователей и закрытых машин переменного тока
B425	IB	20	30	200	0,07	5,40	11***	0,3	0,16	Генераторы питания гальванических ванн при напряжении до 6 В

* Помимо перечисленных электрощеток отечественного производства на контактных кольцах могут работать изделия марок ЭГ14, ЭГ4 и 611М. Изделия последней марки рекомендуются также для машин постоянного тока напряжением свыше 80 В (см. табл. 9-14).

** Твердость по ГОСТ 9506-65.

*** Твердость по Бринеллю, 10^7 Па.

которая характерна для других случаев применения этих изделий на машинах металлургической промышленности. Аналогичная оценка приводится и французскими авторами, указывающими, что значения этой величины лежат в пределах 2,5—5,0 мм/1 000 ч эксплуатации. Меньшие значения получены на генераторах, окружная скорость на рабочей поверхности коллекторов которых составляет 15—18 м/с, а большие на машинах, где она превышает 25 м/с [Л. 9-4].

Щетки для электрических машин железнодорожного транспорта. Основным направлением развития локомотивного парка на железнодорожном транспорте в течение последних лет являлась замена паровозов тепловозами и еще более прогрессивными электровозами. О целесообразности описываемого направления в развитии средств тяги можно судить по таким цифрам: на перевозку одного миллиона тоннокилометров (брутто) груза расходуется при паровой тяге 48 т каменного угля, при тепловой 25 т и при электровозной всего 16 т [Л. 9-5, 9-6]. При помощи прогрессивных транспортных средств в отечественном железнодорожном транспорте осуществлено техническое перевооружение локомотивного парка — в настоящее время практически весь грузооборот в стране выполняется электровозами и тепловозами. Для обеспечения возможности работы электровозов в стране электрифицировано свыше 32 тыс. км железных дорог. Эксплуатируемые здесь электровозы выполняют 47,9% всего грузооборота, используя примерно 5% вырабатываемой в СССР электроэнергии. На долю тепловозов приходится 47,6% грузооборота (данные приведены по состоянию на конец 1970 г.).

Все перечисленные виды транспортных средств используют тяговое электрооборудование постоянного тока; естественно, что для обеспечения его нормальной работы необходим соответствующий ассортимент электрощеток. Используемые на железнодорожном транспорте электрические машины подразделяются в соответствии с ГОСТ 2582-66 на следующие три группы: тяговые генераторы, тяговые двигатели и вспомогательные электрические машины. Последние работают в генераторном и двигательном режимах, обслуживая собственные нужды подвижного состава. Все электрические машины транспортного назначения предназначены для работы в условиях тряски, вибрации, запыленного и влажного воздуха на высоте

1 200 м над уровнем моря при температуре окружающего воздуха от —50 до +40 °С (в тени), при годовой среднесуточной температуре не выше +25 °С. Предельно допустимое превышение температуры коллекторов тяговых машин, изолированных материалами классов А, В, и F по отношению к температуре охлаждающего воздуха, при всех возможных режимах их работы не должно превышать 95 °С. Для машин, изолированных материалами класса Н, последняя цифра повышается до 105 °С.

В отношении коммутации электрические машины транспортного назначения рассчитываются на следующие токи: тяговые генераторы — на максимально допустимый ток при номинальной частоте вращения и такой величины напряжения, которая имеет место при этом токе по рабочей характеристике; тяговые двигатели — на максимально допустимый ток (при номинальном напряжении), равный двойному номинальному току; вспомогательные машины — на максимально допустимый ток при номинальном напряжении (150% номинального значения тока) и при пуске вспомогательного электродвигателя установленным для него способом. Коммутация тяговых машин считается удовлетворительной, если коллектор и щетки при эксплуатации машины в интервале установленных для нее рабочих характеристик остаются в таком состоянии, что не требуется их внеочередной чистки и исправления.

Различия в режимах работы тяговых двигателей и генераторов отражаются на выборе марок и конструкции электрощеток для них. Тяговые генераторы могут эксплуатироваться со щетками, материал которых обладает средней коммутирующей способностью ($N=2$). Тяговые двигатели при использовании аналогичных электрощеток работают недостаточно надежно, и для них оказывается необходимым применять электроугольные материалы, обладающие большей механической прочностью и более высокими значениями индекса коммутации ($N\approx3$).

Последняя рекомендация распространяется на тяговые двигатели, питаемые от сетей постоянного тока, и в еще большей мере на двигатели, питаемые от выпрямителей пульсирующим током. Определенное влияние на эксплуатационные свойства электрощеток тяговых двигателей оказывает выбор их конструкции. Специальными исследованиями установлено, что повысить гарантирован-

ный срок службы электрощеток транспортного назнач-ния можно путем применения разрезных конструкций снабженных резиновыми амортизаторами. Учет перечи-ленных обстоятельств привел к тому, что на железны дорогах страны тяговое электрооборудование эксплуати-руется со щетками, сведения о которых приведены

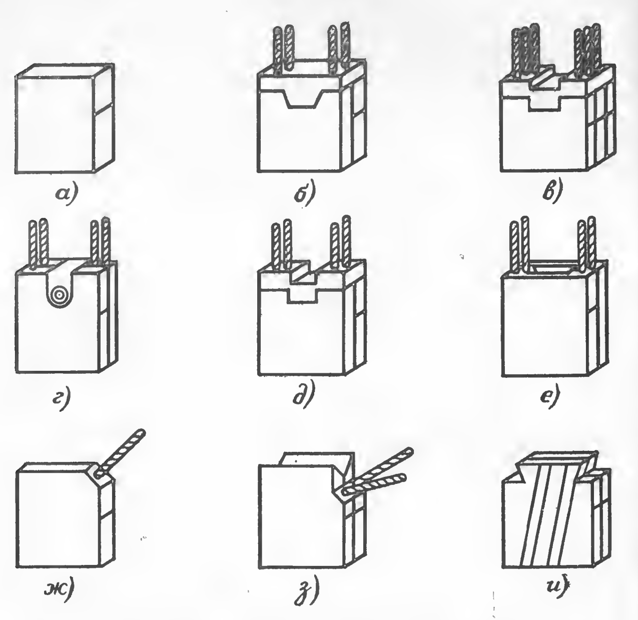


Рис. 9-2. Фасоны и конструкции электрощеток для тяговых двигателей железнодорожного транспорта.

в табл. 9-19 и на рис. 9-2. По схеме табл. 9-19 транспор-ное электрооборудование эксплуатировалось до начал 1970 г. В настоящее время на этом оборудовании сокр-щается использование электрощеток марок ЭГ-2А и ЭГ1 и расширяется применение изделий марок ЭГ61, ЭГ7 ЭГ51 (последние используются на тяговых генератор тепловозов). Вновь применяемые электрощетки обладак более высокими эксплуатационными свойствами и обе-печивают большие пробеги подвижного состава без см-ны комплектов электроугольных изделий.

На вспомогательных электрических машинах прим-няются щетки марок ЭГ2А и ЭГ4. Первые используют в основном на электровозах в соответствии со схемо представленной в табл. 9-20.

Таблица 9-19

Применяемость щеток на тяговом электрооборудовании отечественных железных дорог

Сведения о подвижном составе		Тип установленной электрической машины	Сведения об используемых электрощетках		
Наименование	Серия		Марка	Размеры, мм	Фасон (рис. 9-2)
		Тяговые генераторы			
Тепловоз	ТЭ1	МПТ-84/39	ЭГ14	9×38×55	—
"	ТЭ2	МПТ-84/39	ЭГ14	9×38×55	—
"	ТЭ3	МПТ-99/47	ЭГ14	12,5×32×60	—
"	ТЭ7	МПТ-99/47	ЭГ14	12,5×32×60	—
"	ТЭ10	МПТ-120/49	ЭГ14	12,5×32×60	—
"	2ТЭ10	МПТ-120/49	ЭГ14	12,5×32×60	—
		Тяговые двигатели			
Электровоз	ВЛ19	ДПЭ-340	ЭГ2А	12,5×50×55	*а*
"	ВЛ19М; ВЛ22М	ДПЭ-400	ЭГ2А, ЭГ61	2(8×50×64)	*б*
"	ВЛ22М	ДПЭ-400П	ЭГ2А, ЭГ61	2(8×50×64)	*б*
"	ВЛ8; ВЛ23	НБ-406	ЭГ2; ЭГ61	2(10×50×64)	*б*
"	ВЛ60	НБ-412М**	ЭГ2А; ЭГ61	2(8×50×64)	*б*
"	ВЛ61	НБ-411**	ЭГ2А; ЭГ61	2(8×50×64)	*б*
"	ВЛ80	НБ-413**	ЭГ2А; ЭГ61	2(12,5×40×64)	*д*
"	ВЛ80	НБ-414**	ЭГ2А; ЭГ61	(10+12+10)× ×(40×50)*	*в*
"	ЧС1	AL4846ZT	ЭГ74	14×38×50	*ж*
"	ЧС2, ЧС3	AL4846ET	ЭГ74	16×38×50	*ж*
"	Ф, Фп, Фт, Фр	TAO649	ЭГ74	2(8×36×50)	*з*
"	К	GB317/23a	ЭГ74	2(10×40×50)	*и*
Мотор-вагон	Ср3	ДК-103К	ЭГ2А,	12,5×32×50	*а*
"	ЭР1	ДК-106В	ЭГ2А	16×32×50	*а*
"	ЭР7, ЭР9	РТ-51Д	ЭГ2А	2(12,5×32×50)	*г*
"	ЭР10	ДК-106А2	ЭГ2А; ЭГ61	2(10×32×50)	*г*
Тепловоз	ТЭ1	ДК-304Б	ЭГ2А	2(12,5×40×60)	*д*
"	ТЭ2	ДК-304Б	ЭГ2А	2(12,5×40×60)	*д*
"	ТЭ3	ЭДТ-200Б	ЭГ2А	2(12,5×50×60)	*д*
"	ТЭ7	ЭДТ-200Б	ЭГ2А	2(12,5×50×60)	*д*
"	ТЭ10	ЭД-104	ЭГ2А	2(12,5×40×60)	*е*
"	2ТЭ10	ЭД-104	ЭГ2А	2(12,5×40×60)	*е*

* Электрощетка состоит из трех частей с различными значениями размера по ширине: 10, 12 и 10 мм.

** Двигатели работают от выпрямителей.

Таблица 9-20

Назначение машины	Тип машины	Размеры электрощеток, мм
Двигатель-компрессор	ДК-404А	8×25×50
Двигатель-вентилятор	ДК-403Г	8×25×50
Двигатель-генератор	ДК-401В	10×40×50
Двигатель-генератор	НБ-429Г	16×32×50
Генератор управления	ДК-405А	16×32×50
Двигатель вентилятора	НБ-430	10×25×50

Щетки марки ЭГ4 на вспомогательном электрооборудовании тепловозов используются следующим образом (табл. 9-21):

Таблица 9-21

Назначение машины	Тип машины	Размеры электрощеток, мм
Вспомогательный генератор	МВТ-25/11	12,5×44×40
Вспомогательный генератор	ВГТ-275/150	12,5×44×40
Возбудитель	ВТ-275/120	10,5×44×40
Двигатель топливного насоса	ПН-5	10×12,5×32

В зарубежной практике на электрооборудовании магистральных железных дорог используются электрощетки следующих марок:

ГДР

Е8 — тяговые двигатели электровозов и мотор-вагонов постоянного, переменного и пульсирующего тока с наиболее тяжелыми режимами эксплуатации; Е9 — то же; Е11 — тяговые двигатели постоянного тока; Е14 — тяговые двигатели постоянного тока с тяжелыми условиями коммутации; Е15 — то же.

ПНР

Марка Е13 — тяговые двигатели постоянного тока; марка СЕГ732 — крупные тяговые двигатели.

Англия

EG_3 — тяговые двигатели малой и средней мощности постоянного и переменного (16²/₃ Гц) тока; EG11 — высокоскоростные тяговые двигатели постоянного тока;

EG14D — тяговые двигатели постоянного и переменного (16²/₃ Гц) тока; EG116 — тяговые двигатели переменного тока при частоте 16²/₃ Гц; EG119 — то же; EG6749 — тяговые двигатели электровозов постоянного тока; EG6749N — то же; EG68101 — то же, что и марка Е116.

Франция

EG — мощные тяговые двигатели постоянного тока; EGA — то же; EGOA — то же; EG34 — тяговые двигатели постоянного тока 750 и 1 500 В; EG63 — тяговые двигатели; EG70 — тяговые генераторы с затрудненными условиями эксплуатации; EG97B — тяговые двигатели выпрямленного тока при напряжении до 1 000 В и переменного тока 16²/₃ Гц; EG98B — тяговые двигатели переменного (16²/₃ Гц) тока и тяговые генераторы с затрудненными условиями коммутации; EG99 — вспомогательные электрические машины; EG99B — тяговые двигатели переменного (16²/₃ Гц) тока; EG300 — тяговые двигатели переменного тока при частоте 16²/₃ и 50 Гц; EG306 — тяговые двигатели переменного (16²/₃ Гц) тока; EG316 — то же; EG367 — вспомогательные электрические машины; EG389 — тяговые генераторы с облегченными условиями коммутации; EG618—тяговые двигатели постоянного тока 750 и 1 500 В; EG7097 — тяговые двигатели переменного тока (16²/₃ и 50 Гц); EG7098 — то же.

ФРГ

RP5H — тяговые двигатели переменного (16²/₃ Гц) тока; Е56 — то же; RE59W — тяговые двигатели выпрямленного тока; Е4196/2 — тяговые двигатели переменного (16²/₃ Гц) тока; E4196S — то же; E4550F — тяговые двигатели.

Япония

GH125 — тяговые двигатели и вспомогательные машины; GH135 — тяговые двигатели переменного (16²/₃ Гц) тока; GH325 — тяговые двигатели и вспомогательные машины; EG41T — то же; EG611 — то же; MS5A — тяговые двигатели специальных экспрессов; GH1351 — тяговые двигатели переменного (16²/₃ Гц) тока.

США

АХ5 — высокоскоростные мощные тяговые двигатели постоянного и переменного тока; ТА35 — мощные тяго-

вые двигатели постоянного и переменного тока электровозов и мотор-вагонов; ТА45 — то же; SA35 — генераторы дизель-поездов; SA45 — генераторы тепловозов; SA50— то же; E35 — тяговые двигатели новейших типов.

Характеристики перечисленных марок электрощеточных материалов транспортного назначения отечественного и зарубежного производства приводятся в табл. 9-22. Дополнительные сведения по рассматриваемому вопросу можно найти также в [Л. 9-7] и каталогах зарубежных электрощеточных фирм.

Эксплуатационные свойства щеток для тяговых машин зависят не только от состояния электрооборудования подвижного состава, но и от профиля и состояния пути, на котором этот состав работает, режимов эксплуатации локомотивов (грузовые, пассажирские) и многих других факторов. По английским данным, при благоприятном сочетании перечисленных факторов средняя скорость изнашивания электрощеток на тяговых генераторах составляет 0,5—1,3 мм/10 тыс. км пробега пассажирского тепловоза и 1,0—1,5 мм/10 тыс. км пробега тепловоза, обслуживающего грузовые перевозки [Л. 9-8]. По этим же данным скорость изнашивания электрощеток тяговых двигателей постоянного тока современных типов подвижного состава, обслуживающего пассажирские перевозки, лежит в пределах 0,6—1,6 мм/10 тыс. км пробега локомотива. При обслуживании грузовых перевозок приведенные цифры повышаются до 1,3—2,0 мм/10 тыс. км пробега, в случае работы локомотива с пневматическим торможением и до 2,5—4,0 мм/10 тыс. км пробега при работе локомотива с электрическим торможением. В [Л. 9-4] оценивается скорость изнашивания наиболее совершенных электрощеток на тяговых двигателях французских железных дорог величиной 2,5—3,0 мм/10 тыс. км пробега.

Эксплуатационная оценка транспортных электрощеток, используемых на отечественных железных дорогах, содержится в [Л. 9-9], согласно которой средняя скорость изнашивания изделий марок ЭГ61 и ЭГ74 составляет:

при пассажирских перевозках

на двигателях постоянного тока—до 1,6 мм/10 тыс. км пробега;

на двигателях пульсирующего тока — до 2,5 мм/10 тыс. км пробега;

Таблица 9-22

Характеристики электрощеточных материалов, предназначенных для использования на электрооборудовании магистральных железных дорог

Марка материала	Классификационный индекс (табл. 1-2)	Номинальная плотность тока, А/см²	Максимальная окружная скорость, м/с	Переходное падение напряжения, В	Коэффициент трения
			СССР		
ЭГ2А	IVB	10	45	2,5	0,17
ЭГ61	IVB	13	50	2,4	0,17
			ПНР		
E13	IVA	12	40	1,7—2,7	0,23
СЕГ732	IVB	10	25	2,75±0,5	0,20
			Англия		
EG3	IVБ	8,5	30	1,4—2,4	0,10—0,15
EG11S	IVБ	8,5	50	1,4—2,4	0,10—0,15
EG14D	IVB	9,5	50	1,4—2,4	0,10
EG116	IVB	11	50	2,4—3,6	0,10
EG119	—	9,5	50	2,4—3,6	0,10
EG6749	IVB	9,5	50	1,4—2,4	0,10—0,15
EG6749N	IVB	9,5	50	2,4—3,6	0,10—0,15
			ФРГ		
RP5H	IVB	10	45	2,9	0,12
RE56			См. табл. 9-14		
RE59W			См. табл. 9-7		
E4196/2	IVB	12	50	2,4	0,10
K4196S	IVB	12	50	2,6	0,10
E4550F	IVБ	12	40	3,0	0,10
			Япония		
GH125	IVB	12	50	2,2	0,26
GH135	IVB	12	35	2,4	0,24
EG325	IVB	12	50	2,2	0,26
EG41T	IVБ	10	40	2,0	0,26
EG611	IVБ	12	45	2,2	0,26
EG617	IVБ	12	50	2,2	0,25
MS5A	IVB	12	40	3,6—4,6	0,23—0,27
GH1351	IVB	12	35	2,4	0,24
			ГДР		
E8	—	12	50	3,0	0,20
E9	IVB	12	50	3,2	0,20
E11	IVB	12	40	3,0	0,16
E14			См. табл. 9-14		
E15		12	50	3,3	0,20

Марка материала	Классификационный индекс (табл. 1-2)	Номинальная плотность тока, А/см²	Максимальная окружная скорость, м/с	Переходное падение напряжения, В	Коэффициент трения
		Франция			
EG	IVA	10	25	2,3—3,0	0,12—0,20
EGA	IVB	10	30	2,3—3,0	0,12—0,20
EGOA	IVB	10	30	2,3—3,0	0,12—0,20
EG34D	IVB	10	40	2,3—3,0	0,12—0,20
EG63	IVB	10	25	2,3—3,0	0,20
EG70	IVB	10	50	3,0	0,12—0,20
EG97B	См. табл. 9-14				
EG98B	То же				
EG99	» »				
EG99B	» »				
EG300	IVB	10	50	3,0	0,12—0,20
EG306	IVB	10	50	3,0	0,12—0,20
EG316	IVB	10	50	3,0	0,12—0,20
EG367	—	12	50	2,3—3,0	0,12—0,20
EG389	—	12	45	2,3—3,0	0,12—0,20
EG6183	—	12	40	2,3—3,0	0,12—0,20
EG7097	—	12	45	2,3—3,0	0,12—0,20
EG7098	—	12	45	2,3—3,0	0,12—0,20
		США			
AX5	IVБ	12,5	45	—	—
TA35	IVБ	11	50	—	—
TA45	IVБ	12,5	60	—	—
SA35	IVБ	12	45	—	—
SA45	IVB	13	50	—	—
SA50	IVБ	14	55	—	—
E35	IVБ	11	35	2,7	—

при грузовых перевозках

на двигателях постоянного тока — 2,5 мм/10 тыс. км пробега;

на двигателях пульсирующего тока — до 3,2 мм/10 тыс. км пробега.

Скорость изнашивания (средняя по радиусу) рабочих поверхностей коллекторов тяговых двигателей составляет при этом 0,07—0,08 мм/100 тыс. км пробега локомотива.

Щетки для электрических машин промышленного и городского транспорта. К названным видам подвижного состава относятся электровозы промышленных предприятий, открытых горных разработок и шахтного транспорта, трамваи, троллейбусы и моторные вагоны метрополитена. По скорости движения режимы работы электрооборудования в данных условиях оказываются менее напряженными, чем на магистральном транспорте, но часто повторяющиеся пусковые режимы создают дополнительные трудности для работы элементов скользящего контакта. Номенклатура зарубежных электрощеточных материалов, предназначенных для использования в рассматриваемых условиях, приведена в табл. 9-23. Естественно, что наряду с указанными в последней таблице в данных условиях могут применяться и те электрощетки, которые перечислены в табл. 9-22.

В отечественной практике на тяговых двигателях промышленного и городского транспорта используются электрощетки марок ЭГ2А, ЭГ14 и начавшие применяться в последние годы ЭГ61 и ЭГ74. Здесь их работа характеризуется практически такими скоростями изнашивания, какие приводились при оценке электрощеток магистрального железнодорожного транспорта.

Щетки для автомобильного электрооборудования. В состав автомобильной электрической установки современного автомобиля входят генератор, аккумуляторная батарея, стартер и двигатели различных вспомогательных устройств, таких как стеклоочистителя, вентилятора, обогревателя и др. Общее количество щеток, устанавливаемых на электрооборудовании одного автомобиля, достигает десяти штук, что при годовом выпуске миллиона автомобилей требует изготовления 10 млн. щеток, подобных изображенным на рис. 9-3. Принимая среднюю мощность автомобильного генератора 300 Вт, получаем, что суммарная мощность генераторов, смонтированных на миллионе автомобилей, достигает 300 тыс. кВт.

Приведенные сведения дают представление о количестве необходимых для автомобильного электрооборудования щеток. Что касается их качественных показателей, то здесь необходимо иметь в виду, что электрооборудование рассматриваемого назначения должно удовлетворительно работать при изменении температуры окружающей среды от —40 до +60 °С и при ее относительной влажности, доходящей до 95±3%. Учитывая специфику работы автомобильного электрооборудования, связанную с вибрациями и тряской, его подвергают испытаниям на вибростендах при частоте 2 500 Гц и двойной амплитуде в 1 мм. Все машины автомобильного назначения (за

Таблица 9-23

Электрощетки тягового электрооборудования промышленного и городского транспорта

Марка материала	Классификационный индекс (табл. 1-2)	Номинальная плотность тока, А/см²	Максимально допустимая окружная скорость, м/с	Переходное падение напряжения, В	Коэффициент трения	Область применения
			ГДР			
К111	IIБ	6	20	1,5	—	Тяговые двигатели трамвайных вагонов и шахтных электровозов
G13	IIБ	10	20	1,3	—	Тяговые двигатели трамвайных вагонов
E11	IVВ	12	40	3,0	0,16	Тяговые двигатели трамвайных вагонов и троллейбусов
			ПНР			
E28	IVВ	10	40	2,6—3,4	0,20	Тяговые двигатели вагонов трамвая и троллейбуса
E35	IVВ	10	40	2,2—2,9	0,24	То же
			*Франция**			
P1	IIБ	5	15	2,3—3,0	>0,20	Тяговые двигатели
P10	IIБ	5	15	2,3—3,0	>0,20	» »
EG40	IVВ	10	40	2,3—3,0	0,12—0,20	Тяговые двигатели трамвайных вагонов
			Англия			
IM9101	IIIВ	9,0	30/50	1,4—2,4	<0,10	Тяговые двигатели троллейбусов
IM9115	III	9,0	30/50	1,4—2,4	<0,10	То же
IM9117	III	9,0	20—25	2,4—3,6	0,10—0,15	» »

Марка материала	Классификационный индекс (табл. 1-2)	Номинальная плотность тока, А/см²	Максимально допустимая окружная скорость, м/с	Переходное падение напряжения, В	Коэффициент трения	Область применения
			ФРГ			
RP5H	IVВ	10	45	2,9	0,12	Тяговые двигатели трамвайных вагонов, дизель-электрических автобусов и шахтных электровозов
8618	IVВ	10	45	3,1	0,11	Тяговые двигатели трамвайных вагонов без дополнительных полюсов
RE56	IVВ	12	40	2,4	0,12	Тяговые двигатели трамвайных вагонов с дополнительными полюсами
RC30	IД	12	35	1,9	0,07	Тяговые двигатели шахтных электровозов
			Япония			
EGAS7	IVВ	12	50	2,4	0,26	Тяговые двигатели малой мощности
EGASB	IVВ	12	56	2,4	0,26	То же
A223S	IIА	12	35	2,0—2,6	0,23	Тяговые двигатели трамвайных вагонов
MS5	IVВ	12	40	2,6—3,6	0,27—0,30	Тяговые двигатели вагонов метрополитена

* Помимо указанных трех марок фирма „Ле Карбон Лоррен" рекомендует применять на тяговых двигателях вагонов трамвая и метрополитена электрощетки марок EG34D и EG6183, характеристики которых приведены в табл. 9-22.

исключением стартеров) должны допускать в течение 2 мин работу при повышенной частоте вращения, превышающей не менее чем на 20% максимально возможную в условиях нормальной эксплуатации. Для стартеров это время снижено до 15 с.

Автомобильное электрооборудование работает в большинстве случаев в однопроводной схеме, где в качестве

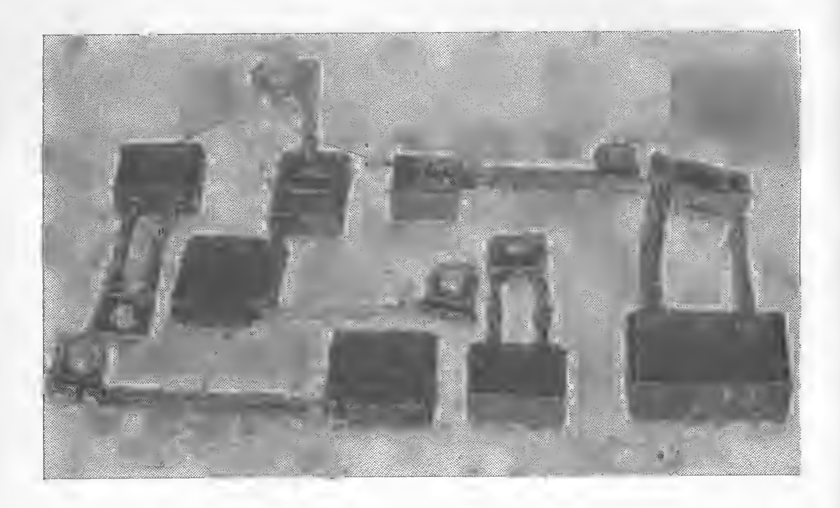


Рис. 9-3. Щетки для автотракторных электрических машин.
а — генераторные; *б* — стартерные.

одного из проводов используется корпус (масса) автомобиля. Коммутация электрических машин автомобильной серии устанавливается в зависимости от режима их работы. Для машин, эксплуатируемых в длительных режимах, степень искрения не должна превышать 1½ по ГОСТ 183-66. Для машин с повторно-кратковременным режимом работы (ПВ не более 50%) допустимая степень искрения может быть повышена до 2.

Допустимые превышения температур коллекторов автомобильного электрооборудования, измеренные термометром при температуре охлаждающего воздуха +35 °С, установлены следующими:

а) для пылезащитных, брызгонепроницаемых машин закрытого исполнения без собственного вентилятора для

продолжительного и повторно-кратковременного (ПВ до 50%) режимов работы не более 100 °С;

б) для пылезащищенных, брызгонепроницаемых машин закрытого исполнения с собственным вентилятором для наружного охлаждения и продолжительного режима работы — не более 85 °С;

в) для машин защищенного исполнения с собственным вентилятором для продувания охлаждающего воздуха и продолжительного режима работы — не более 75 °С.

Допустимые превышения температур частей электрических машин, эксплуатируемых в повторно-кратковременных режимах, с ПВ не более 10% при кратковременных режимах — не нормированы.

Из числа перечисленных электрических машин, устанавливаемых на автомобиле, одной из главных является генератор. Мощность автомобильных генераторов лежит в пределах 125 Вт — 1 кВт. Максимальная частота вращения якоря генератора доходит до 7 500 об/мин, а минимальная в 6,0—8,5 раз меньшая. Номинальное напряжение генераторов автомобилей, выпускаемых в последние 12—15 лет, составляет 12 и 24 В. Схема электрооборудования автомобилей более ранних выпусков работала при напряжении 6 В. Привод генератора состоит из текстропной передачи, связывающей его с валом поршневого двигателя внутреннего сгорания. Поскольку последний работает с переменной частотой вращения, а от генератора требуется напряжение постоянной величины, то в схему вводится регулятор напряжения. Еще одна особенность автомобильного генератора состоит в том, что он всегда работает параллельно с аккумуляторной батареей. Нагрузка между указанными источниками электроэнергии распределяется примерно следующим образом: 80—98% времени работы автомобиля его установки получают питание от генератора, а остальное время — от батареи. Наряду с отмеченным функциональным распределением времени работы каждого из источников электроэнергии на автомобиле, распределение тока между ними зависит еще от степени заряженности аккумуляторов и настройки реле, регулирующего ток в контуре «генератор — батарея». Вышеизложенные обстоятельства, характеризующие специфику режима работы автомобильных генераторов, привели к тому, что для последних потребовалась разработка специальных электрощеточных материалов, характеристики которых приведены в табл.

Таблица 9-24

Характеристики электрощеточных материалов, предназначенных для использования на автомобильных генераторах

Марка материала	Классификационный индекс (табл. 1-2)	Номинальная плотность тока, А/см²	Максимально допустимая окружная скорость, м/с	Переходное падение напряжения, В	Коэффициент трения
			СССР		
ЭГ13	IVB	11	40	2,7	0,17
ЭГ13П	IVB	11	40	2,7	0,17
			*ГДР**		
G12	IIБ	10	20	1,4	—
G13	IIБ	10	20	1,3	—
E18	IIIB	12	20	2,5	0,20
			ЧССР		
TA45	IIБ	8	15	—	—
EK38	IVB	10	30	3,5	0,20
EK62	IVA	10	30	3,8	0,20
M30	IГ	15	25	1,1—1,6	0,20
			Франция		
LFC62	IIIB	7	40	>3,0	0,12—0,20
BG28	IIIБ	7	35	>3,0	0,12—0,20
BG417	IIIБ	10	40	>3,0	0,12—0,20
			*Англия***		
B	IIA	8,5	20	1,4—2,4	0,15—0,20
H100	II	6,5	30	1,4—2,4	0,10
H800	II	6,5	30	1,4—2,4	0,15—0,20
IM2	IIIB	6,0	30	3,2	0,15
PM50	IIIB	6,5	30	2,4—3,6	0,15—0,20
			Япония		
TG111	IVA	9	50	2,0	0,25
TG113	IVA	9	50	2,0	0,27
TG310	IVB	12	50	2,3	0,25
TG501	IVB	12	50	2,0	0,25
TG600	IVB	10	40	2,5	0,27
TG601	IVB	10	35	2,5	0,27
CH235	IVB	10	35	2,0	0,23

* Помимо указанных трех марок для рассматриваемых условий рекомендуются электрощетки марок E14, E15 и M8, характеристики которых приведены в табл. 9-14 и 9-18.

** Помимо указанных пяти марок для генераторов постоянного тока фирма рекомендует применять электрощетки марок EG3 и EG12, а для генераторов переменного тока электрощетки марок CM5B, EG0, EG12 и IM9101, характеристики которых приведены в табл. 9-14, 9-18, 9-23.

9-24. Относительно небольшое количество указанных в табл. 9-24 марок электрощеток, изготавливаемых отечественной промышленностью, объясняется тем, что здесь перечислены только те электрощетки, которые устанавливаются на автомобильных генераторах постоянного тока. Генераторы переменного тока оборудуются электрощетками марок ЭГ51, М1 и М1А, характеристики которых приводились ранее в табл. 9-14 и 9-18.

При использовании в эксплуатации отечественные электрощетки марок ЭГ13 и ЭГ13П работают при токовых нагрузках, значительно превышающих предусмотренные для них соответствующей технической документацией. Степень этого превышения может быть установлена путем сравнения соответствующих цифр табл. 9-24 и 9-25.

Возможность значительного повышения фактической плотности тока по сравнению с указанной в технической документации на электрощетки объясняется соображениями, изложенными в гл. 8.

Другой основной электрической машиной автомобиля является стартер. Он состоит из электродвигателя, редуктора, сцепляющего механизма и приборов управления. Наибольшее значение мощности стартерного двигателя может быть получено при минимально возможном значении переходного падения напряжения установленных на нем электрощеток. Однако малые значения $2\Delta U$ не обеспечивают удовлетворительного протекания коммутационного процесса. Оптимальное решение задачи получают путем использования на автомобильных стартерах электрощеток, изготовленных из материалов группы I. Так, английские автомобилестроители используют на стартерах напряжением 6—12 В электрощетки марок CMO, CMIS, CM2, CM3H, CM5B и CM5H, а на стартерах напряжением 24 В — электрощетки марок CM5B, CM5H, DM4A, DM4D, DM100 и DM3632A. Характеристики перечисленных здесь электрощеток серии CM приводились ранее в табл. 9-18. Изделия серии DM изготавливаются из углеродистого материала, пропитанного металлом таким образом, что металл и графит присутствуют не в виде дискретных частиц, а в непрерывной фазе. Этот материал допускает работу при окружной скорости коллекторов до 20 м/с, имеет переходное падение напряжения 0,8—1,4 В и коэффициент трения 0,15—0,20. Во Франции для применения на стартерах предназначаются электрощетки марок ОМС, МС79 и МС3702; в Японии — марок

Таблица 9-25

Режимы работы электрощеток на автомобильных генераторах постоянного тока

Наименование показателей	Тип генератора			
	Г-12	Г-22	Г-108	Г-130
Марка автомобиля, на котором применяется генератор	ЗИЛ-157 ЗИЛ-164 „Волга“	Москвич-407	ЗИЛ-164 ГАЗ-51А ГАЗ-53Ф ЗАЗ-965	ЗИЛ-130 ГАЗ-53 ГАЗ-56
Номинальная мощность генератора, Вт	250	200	250	350
Номинальное напряжение генератора, В	12,5	12,5	12,5	12,5
Максимальная сила тока нагрузки, А	20	16	20	28
Марка используемых электрощеток	ЭГ13	ЭГ13	ЭГ13	ЭГ13П
Количество электрощеток на генераторе	2	2	2	2
Давление на электрощетки, сН (гс)	600—800	600—800	600—800	800—1 300
Размеры электрощеток, мм	6,4×16×21	6,4×16×21	6,4×16×21	6,4×22,3×23,5
Плотность тока в электрощетке при максимальном токе, А/см²	19,6	15,7	19,6	19,6

Таблица 9-26

Характеристики электрощеточных материалов, предназначенных для использования на автомобильных стартерах в СССР, ГДР, ПНР, ЧССР, ФРГ

Марка материала	Классификационный индекс (табл. 1-2)	Номинальная плотность тока[5], А/см²	Максимально-допустимая окружная скорость, м/с	Переходное падение напряжения, В	Коэффициент трения
			СССР[1]		
МГС5	IБ	15	35	1,3	0,15
МГСО12	IA	20	15	0,4	0,17
МГС20	IБ	—	—	0,4—1,2	0,25
			ГДР[2]		
M15	IA	20	20	0,50	0,1—0,2
M18	IД	12	20	1,80	0,1—0,2
M31	—	—	—	1,20	0,1—0,2
M32	—	—	—	1,20	0,1—0,2
			ПНР[3]		
СМГ706	IБ	15	15	1,00±0,5	0,20
СМГ707	IБ	15	15	1,20±0,4	0,25
			ЧССР		
M8	IB	20	15	0,4—0,6	0,20—0,25
M15	IA	20	20	0,9—1,2	0,2—0,25
			ФРГ[4]		
RG61	II	14	30	1,8	0,16
K4	IД	16	30	1,1	—

[1] Могут применяться также электрощетки марки МГСО (см. табл. 9-18).
[2] Могут применяться также электрощетки марок M17 и M19 (см. табл. 9-18).
[3] Могут применяться также электрощетки марки СМГ701 (см. табл. 9-18).
[4] Могут применяться также электрощетки марок E12 и E1350 (см. табл. 9-18).
[5] Приведенные значения плотности тока являются номинальными, При использовании электрощеточных материалов на старетрах фактическая плотность тока повышается до нескольких десятков (рабочий ток стартера) и даже сотен (при полностью заторможенном якоре стартера) А/см².

MG26, MG28, MG30, ML11, MK6 и MK10. Все перечисленные марки электрощеток описаны в табл. 9-18. В табл. 9-26 изложены сведения об электрощеточных материалах рассматриваемого назначения, изготавливаемых в СССР, ПНР, ЧССР и ГДР. Эксплуатационные режимы работы электрощеток при использовании их на некоторых типах стартеров отечественного производства характеризуются данными, приведенными в табл. 9-27. В табл. 9-27 обращают на себя внимание фактические значения плотностей тока в электрощетках при рабочем

Режимы работы электрощеток на автомобильных стартерах

Наименование показателей	Тип стартера: СТ-8, СТ-15Б	СТ-26	СТ-103	СТ-113	СТ-130, СТ-130Б
Марка автомобиля, на котором применяется стартер	ЗИЛ-164, ГАЗ-51	МАЗ-500, МАЗ-503, МАЗ-504, КрАЗ-214, КрАЗ-219, КрАЗ-221, КрАЗ-222		ГАЗ-56, „Волга“, УАЗ-451	ЗИЛ-130, ГАЗ-53А, ГАЗ-66
Номинальная мощность стартера, л. с.	1,4	13,0	7,0	1,5	1,5
Рабочий ток стартера, А	250	700	600	225	225
Ток при полном торможении якоря, не более А	600	900	800	530	650
Марка используемых электрощеток	МГСО	МГС5	МГС5	МГСО	МГСО
Количество электрощеток на стартере	4	8	8	4	4
Давление на электрощетки, сН (гс)	850—1 400	1 250—1 750	1 250—1 750	1 200—1 500	1 200—1 500
Размеры электрощеток, мм	8,8×19,2×14	12×32×20	12×32×20	8,8×19,2×14	8,8×19,2×14
Плотность тока в электрощетке, А/см²:					
при рабочем токе стартера	74	45	39	67	67
при полном торможении якоря	177	58	54	157	192

токе стартера и при полностью заторможенном его якоре в момент пуска. В первом случае отмечаемые значения достигают нескольких десятков, а во втором — двух сотен ампер на квадратный сантиметр. Подобные обстоятельства имеют место и на стартерах зарубежного производства. Вот почему в новейших каталогах на электрощеточную продукцию при описании стартерных щеток в графах, характеризующих допустимую для них номинальную плотность тока можно встретить трехзначные цифры.

Устанавливаемые на автомобилях малогабаритные электродвигатели (ГОСТ 9443-60) используются в качестве приводов стеклоочистителей, вентиляторов и других вспомогательных механизмов. Для этих двигателей применяются некоторые из числа ранее описанных марок электрощеток. Так, в промышленности ГДР для двигателей стеклоочистителей рекомендуется применять электрощетки марок Е18, М7, М8, характеристики которых приводились в табл. 9-24 и 9-18; для двигателей вентиляторов — щетки марки М11 (табл. 9-24); для других вспомогательных машин — щетки марок Е8 и Е14 (табл. 9-14). В Англии для вспомогательных автомобильных электродвигателей рекомендуется применять электрощетки марок СМ2, СМ9, СМ3Н, СМ5В и СМ5Н (табл. 9-18).

Наряду с перечисленными выше для описываемых двигателей в некоторых странах изготавливаются электрощетки специализированных марок. Отечественная промышленность выпускает для этих целей электрощетки марки «96» (ГОСТ 12919-67), допускающие работу при номинальной плотности тока 15 А/см², максимальной окружной скорости 20 м/с и удельном нажатии 200—300 гПа (гс/см²). Удельное электрическое сопротивление материала марки «96», равно 2,6 Ом · мм²/м; переходное падение напряжения 1,1 В, коэффициент трения не более 0,18.

Английская фирма «Морганайт» для указанных целей рекомендует специализированные электрощетки марки DM4A, допускающие работу при номинальной плотности тока до 11,5 А/см² и максимальной окружной скорости до 20 м/с. Удельное электрическое сопротивление материала этой марки достигает 3,0 Ом · мм²/м, переходное падение напряжения 0,8 В и коэффициент трения не более 0,20.

Фирма «Тосиба Денко Компани» (Япония) предназначает для автомобильных электродвигателей щетки марки MG9RB, допускающие работу с номинальной плотностью тока 15 А/см², максимальной окружной скоростью 30 м/с и удельным нажатием 150—250 гПа (гс/см²). Удельное электрическое сопротивление материала этой марки достигает 12 Ом · мм²/м, переходное падение напряжения 0,6 В и коэффициент трения 0,27.

Наблюдения за эксплуатацией автомобильных генераторов и стартеров позволили установить, что средняя скорость изнашивания применяемых на них электрощеток лежит в пределах 0,2—0,9 мм/10 тыс. км пробега автомобиля. Среднее квадратическое отклонение приведенных значений $\sigma_{v щ}$ не превышает 0,3 мм/10 тыс. км пробега. В последнее время наметилась тенденция оценивать свойства автомобильных электрощеток путем нормирования в технической документации обеспечиваемых ими эксплуатационных показателей. Так, например, в каталоге фирмы «Морганайт» указывается, что изготавливаемые ею изделия марки СМО обеспечивают не менее 40 тыс. пусков стартера напряжением 12 В [Л. 9-10]. В СССР ГОСТ 12919-67 гарантирует 100 тыс. включений стартера типа СТ-15, оборудованного электрощетками марки МГСО. В этом же стандарте указаны гарантийные 1 000-часовые сроки службы электрощеток марок ЭГ13 и ЭГ13П на автомобильных генераторах типов Г-108 и Г-214А-1 и 3 000-часовой гарантийный срок службы электрощеток марки М1 на генераторе типа Г-250.

Техническая документация, нормирующая характеристики износа щеток автомобильного электрооборудования итальянских фирм, предусматривает, что за 500 ч испытаний генератора переменного тока износ установленных на нем электрощеток не должен превышать 1,5 мм. Нормы износа стартерных электрощеток в промышленности Италии дифференцированы по типам машин. Для ряда этих типов норма износа, определяемого в процессе проведения пятисот испытательных пусков, не должна превышать указанных в табл. 9-28.

Износ коллектора стартера после проведения описываемых пятисот испытательных пусков не должен превышать 0,02 мм (по диаметру).

Щетки для судовых электрических машин. Для обеспечения разнообразных нужд современного судостроения в различных странах созданы соответствующие серии

Таблица 9-28

Тип стартера	Ток, А	Напряжение, В	Максимально допустимый износ щеток, мм
B76-0,5/12	130±5	10±0,3	0,6
E100-1,5/12	300±10	9,3±0,3	0,7
E115-1,8/12	400±15	9,5±0,3	0,6
E115-3/24	310±10	18,5±0,5	1,1
E150-10/24	1 000±30	16±0,5	1,0
C125-4/24	575±15	18±0,5	1,4
C150-7/24	750±20	18±0,5	1,0

электрических машин. При проектировании этих машин им стремятся придать минимально возможные габаритные размеры и массу, а также приспособить к эксплуатации в следующих условиях: а) температура окружающего воздуха до +40 °С; б) относительная влажность окружающего воздуха до 95±3%; в) качка корабля с креном до 45° и дифферентом до 15°; г) длительный крен до 15° и длительный дифферент до 10°; д) частые сотрясения и перегрузки до 10% сверх номинального тока в течение 2 ч и 50% перегрузки в течение 2 мин.

Помимо приведенных характеристик окружающей среды в судовых условиях следует учитывать наличие в атмосфере морских солей, содержание которых доходит до 2—5 мг на 1 м³ воздуха. Кроме того, в машинных отсеках, вблизи дизелей, в воздухе накапливаются пары нефти, количество которых непосредственно над машинами колеблется в пределах 3—20 мг/м³. Очевидно, что указанные обстоятельства делают необходимой защиту судового электрооборудования от коррозионных воздействий.

Выбор рода тока для судовых электрических машин определяется прежде всего технико-экономическими соображениями. Машины постоянного тока благодаря своей высокой перегрузочной способности и отличным регулировочным характеристикам находят на судах с электродвижением широкое применение. Однако при мощностях свыше 4 000—5 000 кВт машины постоянного тока по к. п. д., массе и габариту уступают машинам переменного тока, и электродвижение очень крупных судов принято осуществлять с помощью этих последних. Исключение составляют суда специального назначения, например ледоколы. Здесь постоянный ток применяется при всех мощностях установленных на них электродвигателей.

Номенклатура электрических машин, используемых в отечественном судостроении, по данным [Л. 9-11—9-13] включает в себя различные типы машин серий П, ПГ, ГПМ, ПД, ДПМ, ПС, ПГ, ПГК и МП.

Единая серия П включает в себя генераторы и двигатели постоянного тока брызгонепроницаемого и водозащищенного исполнения с кремнийорганической изоляцией класса Н. В судостроении используется часть типов машин данной серии от нулевого до семнадцатого габаритов, охватывающих диапазон мощностей 0,3—1 400 кВт. Серия ГПМ содержит ряд типов машин постоянного тока, предназначенных для использования в генераторном режиме при $n=1\,500$ об/мин. Серия ПД состоит из трех генераторов постоянного тока типов ПД-150-6, ПД-151-6 и ПД-152-5-9, имеющих соответственно мощности 200, 300 и 400 кВт. Все генераторы работают при $n=500$ об/мин и предназначены для судовых электростанций и питания гребных электродвигателей. В серию ДПМ (модификация серии ДП) входит ряд типов двигателей постоянного тока напряжением 110 и 220 В, перекрывающих диапазон мощностей 1,8—75 кВт. Эти двигатели используются в качестве приводов судовых механизмов с кратковременным и повторно-кратковременным режимами работы. Исполнение двигателей водозащищенное; изоляция кремнийорганическая, n равно 780 (тихоходные) и 1 850 (быстроходные) об/мин. Серия ПС включает несколько типов высокоскоростных двигателей постоянного тока. Двигатели 1-го—6-го габарита перекрывают диапазон мощностей 0,54—39 кВт при $n=3\,000\div4\,000$ об/мин. Мощность машин 7-го и 8-го габарита составляет 32—60 кВт при $n=2\,600\div3\,600$ об/мин. Двигатели 9-го—11-го габарита при $n=2\,750$ об/мин охватывают мощности 50,5—412 кВт. В серию ПГ входит ряд типов машин постоянного тока, каждая из которых имеет вполне определенное назначение. Так, машина типа ПГ-3-2 мощностью 100 кВт при $n=4\,000$ об/мин предназначена для применения в качестве привода пожарных насосов. Машина ПГ-33-3 используется в качестве генератора судовых электростанций. Двухъякорный генератор типа ПГ-145 (2×625 кВт, 810 об/мин) предназначен для питания гребных электродвигателей. Для привода гребных винтов в этой серии предназначены машины типов ПГ-146 (1 178 кВт; 212/266 об/мин), ПГ-147 (1 824 кВт, 152/202 об/мин), ПГ-150 (2 350 кВт, 150 об/мин),

ПГ-150-8К (300 кВт, 490 об/мин) и ПГ-178-8К (700 кВт, 196/210 об/мин).

К рассматриваемой серии следует также отнести машину типа 2ПГК-120/150, используемую в качестве генератора питания гребных двигателей. Мощность этого двухъякорного генератора равна 2×1 920 кВт при частоте вращения 595 об/мин.

Серия МП содержит в своем составе следующие четыре типа машин, предназначенных для привода винтов (табл. 9-29).

Таблица 9-29

Тип	Мощность, кВт	Напряжение, В	Частота вращения, об/мин
2МП-7000-115	2×2555	1 000	115/140
2МП-7000-125	5125	1 000	125/170
2МП-9800-150	2×3626	1 200	150/215
2МП-19600-150	2×7178	1 200	150/195

При использовании на судне переменного тока в качестве источников электроэнергии применяются синхронные генераторы. Серии применяемых генераторов и характеристики каждого из них, по данным [Л. 9-11], таковы (табл. 9-30):

Таблица 9-30

Обозначение серии	Краткая характеристика серии
МС	Содержит 12 типов машин мощностью 25—1 250 кВт. Машины снабжены возбудителями типа ВСМ
МСК	Содержит ряд типов машин мощностью 31—1 875 кВт. Самовозбуждение через селеновый выпрямитель
МСС	Содержит три типа машин мощностью 275—500 кВт
МСЗ	Содержит два типа машин мощностью 375 и 500 кВт
ГСС	Содержит один тип машины мощностью 125 кВт
ТМВ	Содержит три типа машин мощностью 2 500—5 000 кВт

Описанное разнообразие типов, мощностей и назначений электрических машин обеспечивается соответствующей номенклатурой марок электрощеток, причем в данной серии машин может использоваться не одна, а несколько марок электроугольных изделий. Так, например,

обстоит дело с подбором электрощеток к машинам серии П. Машины этой серии мощностью 80—100 кВт оборудуются электрощетками марки ЭГ71. Крупные машины серии снабжаются электрощетками марки ЭГ74. Последняя марка широко распространена на мощных машинах серий ГПМ, ПС, ПГ и МП. Машины малой мощности перечисленных серий удовлетворительно работают с электрощетками марки ЭГ14, которые обеспечивают также удовлетворительную работу всех двигателей серии ДПМ.

Синхронные машины всех серий снабжаются электрощетками марок ЭГ4 и 611М. Две последние марки используются иногда на машинах малых мощностей серии П.

Конструкции электрощеток в своем подавляющем большинстве являются радиальными (тип К-1 ГОСТ 12232-66) и только в отдельных случаях встречаются реактивные (тип К-3 того же ГОСТ).

Размеры применяемых щеток практически совпадают с теми, которые используются на электрооборудовании металлургических заводов. Для машин серии ДПМ, оборудуемых электроугольными изделиями марки ЭГ14, шкала размеров последних имеет вид, представленный в табл. 9-31.

Таблица 9-3

Тип электродвигателя	Размеры щеток, мм, при номинальном напряжении, В	
	110	220
ДПМ-11	12,5×16×32	10×16×25
ДПМ-12	12,5×16×32	10×16×25
ДПМ-21	12,5×32×40	12,5×32×40
ДПМ-22	—	12,5×32×40
ДПМ-31	16×32×40	12,5×32×40
ДПМ-32	—	16×32×40
ДПМ-41	—	16×32×40
ДПМ-42	—	16×32×40
ДПМ-52 (тихоходный)	—	16×32×40
ДПМ-52 (быстроходный)	—	20×32×40
ДПМ-62	—	20×32×40

Помимо рассмотренных генераторов и двигателей на судах находят себе применение одноякорные преобразователи, преобразующие постоянный ток в однофазный переменный. Подбор щеток для электрических машин этого назначения осуществлен по схеме, представленной в табл. 9-32.

Таблица 9-32

Тип преобразователя	Коллектор		Контактное кольцо	
	Марка электрощеток	Размеры электрощеток, мм	Марка электрощеток	Размер электрощеток, мм
ПО-12Ф, ПО-12АФ	ЭГ14	4×5×15	М6	4×5×15
ПО-300А, ПО-300АФ	М6	10×16×20	М6	8×8×22
ПО-300Б, ПО-300В	ЭГ4	10×16×20	М6	8×8×22
ПО-550Ф, ПО-550АФ	Г3	10×12,5×20	М6	8×10×20
ПО-600, ПО-1000	ЭГ4	10×16×20	М6	8×8×22
ОП-120А	М6	10×12,5×20	МГ6	8×10×20
ОП-120Л, ОП-12АЛ	Т2	6,4×8×20	Г3	6,4×8×20
ОП-120Ф1, ОП-120Ф2	Т2	6,4×8×20	Г3	6,4×8×20
ОП-120Ф3	М6	10×12,5×20	Г3	6,4×8×20
ОП-120Ф4, ОП-120Ф5	Т2	6,4×8×20	Г3	6,4×8×20

При внимательном рассмотрении номенклатуры марок щеток, используемых на судовых электрических машинах, можно обнаружить, что здесь нашли себе применение те же марки, которые упоминались ранее, при описании других областей использования электроугольных изделий. Подобное положение характерно не только для отечественной промышленности. В каталогах крупнейших зарубежных фирм, поставляющих электрощеточную продукцию на мировые рынки, щетки морского назначения специально не выделяются. Упоминание о возможности использования электрощеток тех или иных марок в судовых условиях делается после того, как описаны другие возможные области их применения. Именно так рекомендованы в соответствующих каталогах электрощеточные материалы марок EG10, EG225, EG226, IM91901 фирмы «Морганайт», RE54 фирмы «Рингсдорф», E4 и E4647 фирмы «Шунк и Эббе» и TG401, TG404 и G25P фирмы «Тосиба Денко Компани». Исключение из этого правила составляет предлагаемая фирмой «Морганайт» электрощетка марки EG6345, относительно которой сообщается, что она предназначена специально для судового электрооборудования постоянного тока средней мощности. Технические характеристики электрощеток таковы:

Номинальная плотность тока, А/см²	9,5
Максимальная окружная скорость, м/с . . .	30
Переходное падение напряжения, В	1,4—2,4
Коэффициент трения	0,10—0,15

Эксплуатационные свойства электрощеток рассматриваемого назначения изучены недостаточно полно. Некоторые сведения по этому вопросу можно найти в табл. 9-33, где представлены результаты наблюдений за работой ряда марок электрощеток отечественного и зарубежного производства на электрических машинах ледоколов и транспортных судов ледокольного типа. Приведенные данные свидетельствуют о том, что значения $\bar{v}_{щ}$ для подавляющего большинства изученных случаев не превышают 3 мм/1 000 ч. Скорость изнашивания рабочих поверхностей коллекторов при этом не должна превышать 0,1 мм/1 000 ч (по радиусу).

Щетки для электрических машин гражданского воздушного флота. Стремительное развитие авиационной техники привело к тому, что во всем мире значительно вырос объем пассажирских и грузовых перевозок, совершаемых с помощью летательных аппаратов. Особое развитие этот вид перевозок получил в нашей стране. Гражданский воздушный флот Советского Союза (Аэрофлот) является крупнейшим авиатранспортным предприятием мира, протяженность воздушных путей которого к началу 1973 г. достигла восьмисот тысяч километров. На воздушных трассах Аэрофлота эксплуатируется парк современных самолетов и вертолетов, осуществляющих полеты в самые различные районы планеты. Среди большого числа установленного на них машин, оборудования и аппаратов находится также значительное количество электротехнического оборудования.

Идея использования электричества в авиации зародилась еще в 1869 г., когда А. Н. Лодыгин в своем проекте летательного аппарата тяжелее воздуха предусмотрел установку на нем электродвигателя, питаемого от разработанного П. Н. Яблочковым аккумулятора. На построенных в России первых бомбардировщиках «Русский витязь», «Илья Муромец» и «Святогор» электричество было применено для зажигания, освещения, обогрева и радиосвязи.

Снабжение электроэнергией производилось генераторами переменного тока мощностью 0,5—2,0 кВ·А. С 1919 г. в авиации начали применять постоянный ток напряжением 8 В, которое в последующем последовательно повышалось до 12 В в 1923 г. и до 24 В в 1930 г. В 1934 г. на самолете «Максим Горький» впервые широко был применен трехфазный переменный ток напряже-

Таблица 9-33

Оценка эксплуатационных свойств щеток, используемых на электрических машинах ледоколов и транспортных судов ледокольного типа

Сведения об электрических машинах					Эксплуатационные свойства электрощеток			
Назначение	Тип	Мощность, кВт	Напряжение, В	Частота вращения, об/мин	Марка электрощеток	Степень искрения	Скорость изнашивания, мм/1 000 ч: Номинальное значение $\bar{v}_{щ}$	Скорость изнашивания, мм/1 000 ч: Среднее квадратичное отклонение $\sigma_{vщ}$
Атомный ледокол „Ленин"								
Гребной двигатель бортовой	2МП-9800-150	7 200	1 200	150/215	ЭГ14	$1^1/_4$	2,3	1,5
Дизель-электрический ледокол типа „Москва"								
Главный генератор ГЭУ	GM434/80-8*	2 160	600	480	ЭГ74	$1^1/_4$	0,6	0,2
					EG-3532*	$1^1/_4$	2,1	0,5
Гребной двигатель	GM524/130-10*	8 100	1 200	115/155	ЭГ51	$1^1/_4$	1,9	0,5
					RE59*	$1^1/_4$	1,5	0,4
Двигатель шпиля	THR-59*	11	380	960	611М	$1^1/_4$	0,2	0,1
Генератор буксирной лебедки	G304/24-6*	261	330	1 460	ЭГ74	$1^1/_4$	0,9	0,4
Генератор судовой электростанции	F3541-100*	385	400	480	611М	$1^1/_4$	0,8	0,01

Сведения об электрических машинах					Эксплуатационные свойства электрощеток			
Назначение	Тип	Мощность, кВт	Напряжение, В	Частота вращения, об/мин	Марка электрощеток	Степень искрения	Скорость изнашивания, мм/1 000 ч: Номинальное значение $\bar{v}_{щ}$	Скорость изнашивания, мм/1 000 ч: Среднее квадратическое отклонение $\sigma_{vщ}$
Дизель-электрический ледокол типа „Капитан Мелехов"								
Главный генератор ГЭУ	GTKUL-135/346*	1 370	400	325	ЭГ74 EG99*	1 1/4 1 1/4	0,7 0,3	0,4 0,2
Гребной двигатель	GTKUL-220/5010*	2 560	400	180	ЭГ74	1 1/4	0,4	0,2
Дизель-электрическое ледокольное судно типа „Лена"								
Главный генератор ГЭУ	МРС-60/84*	1 392	400	360	ЭГ74 EG12*	1 1/2 1 1/2	2,5 3,9	1,3 1,1
Гребной двигатель	МРС-108/88*	2 573	800	150/180	ЭГ14 EG12*	1 1/2 1 1/4	1,4 3,5	0,7 1,0
Генератор судовой электростанции	МР-29/44	225	230	428	ЭГ14 EG12* ЭГ74	1 1/4 1 1/4 1 1/4	0,5 0,5 0,1	0,2 0,1 0,2

* Изделия (машины, электрощетки) зарубежного производства.

нием 120 В и постоянный ток напряжением 27 В. Последнее напряжение продолжает сохраняться в системах самолетного энергоснабжения постоянным током и теперь. Наряду с отмеченным в современном самолетостроении развивается применение систем трехфазного тока напряжением 200/115 В. Мощность самолетных генераторов постоянного тока также претерпела существенные изменения. Если на самолетах, строившихся в 1919 г., мощность таких генераторов составляла всего 36 Вт, то теперь мощность самолетного генератора достигает 18 кВт, а суммарная мощность устанавливаемых на одном самолете источников электроэнергии доходит до 250 кВт [Л. 9-14].

Описываемые достижения в области электрификации летательных аппаратов обусловлены развитием электротехнического оборудования, способного удовлетворительно работать в рассматриваемых условиях эксплуатации. Применительно к деталям узла токосъема общие технические требования к самолетным электрическим машинам формулируются следующим образом:

1) надежность и безотказность действия в любых условиях полета как на высоте, так и у земли при любом положении в пространстве;

2) высокая механическая, электрическая и термическая прочность при достаточной химической стойкости, вибростойкость, быстрая готовность к работе;

3) способность нормально работать при изменении температуры окружающей среды от +50 до —60 °С, изменении давления этой среды от 1 000 (уровень моря) до 53 гПа (высота 20 км) (т. е. от 796 до 40 мм рт. ст.) и относительной влажности до 98% (при 20 °С);

4) удобство и безопасность в обращении, взрыво- и пожаробезопасность в эксплуатации, малая уязвимость и большая живучесть;

5) минимальные габаритные размеры и масса;

6) минимальное воздействие на работу магнитных компасов и радиоустройств;

7) простота ухода и эксплуатации;

8) минимальная стоимость;

9) унификация и взаимозаменяемость отдельных узлов и деталей.

Из числа перечисленных требований наибольшую трудность представляет удовлетворение третьего, касающегося необходимости обеспечить работу скользящего

контакта при значительном снижении давления окружающей среды, обусловленного подъемом летательного аппарата на высоту. В гл. 5 было описано явление форсированного изнашивания электрощеток, эксплуатируемых в высотных условиях, и показано, что для нормализации их работы в этих условиях приходится создавать специальные электрощеточные материалы. Для разных по назначению самолетных электрических машин эти материалы должны быть различными.

Одной из главнейших электрических машин современного самолета является генератор. В отечественном самолетостроении используется несколько серий генераторов переменного и постоянного тока. Для рассматриваемых здесь вопросов последние и представляют наибольший интерес.

Наиболее совершенными генераторами постоянного тока из числа применяемых на самолетах Аэрофлота являются генераторы серии ГСР. В них применены нагревостойкие материалы на основе стекла и кремнийорганических соединений, что наряду с использованием высококачественной электротехнической стали и усовершенствованной системы охлаждения продувом встречным потоком позволило создать вполне надежную систему электроснабжения бортовой сети [Л. 9-14]. В рассматриваемую серию входят генераторы ГСР-3000, ГСР-6000, ГСР-9000, ГСР-СТ-9000, ГСР-12000, ГСР-СТ-12000, ГСР-18000, ГСР-СТ-18000. Работая при частоте вращения 400—9 000 об/мин при напряжении 28,5 В, перечисленные типы генераторов перекрывают диапазон мощностей 3—18 кВт при нужной высоте полета летательного аппарата до 20 км. Номинальная работа узла токосъема генераторов серии ГСР обеспечивается за счет использования электрощеток марок МГС7, МГС7И и МГС8 [Л. 9-14, 9-15]. Количество устанавливаемых на каждом генераторе щеткодержателей и электрощеток указано в табл. 9-34.

Среди упомянутых генераторов имеется несколько типов, в обозначении которых находятся буквы «СТ». Подобное обозначение свидетельствует о том, что данный тип генератора может работать в двигательном (стартерном) режиме, осуществляя запуск турбодвигателя самолета.

Наряду с комбинированными стартер-генераторами в авиации используются специализированные электрические стартеры. Они представляют собою электрические

Таблица 9-34

Тип генератора	Количество		Тип генератора	Количество	
	щеткодержателей	щеток		щеткодержателей	щеток
ГСР-3000	4	4	ГСР-12000	8	24
ГСР-6000	4	8	ГСР-СТ-12000	8	24
ГСР-9000	6	18	ГСР-18000	8	24
ГСР-СТ-9000	6	12	ГСР-СТ-18000	8	24

машины серии СТ, СТ-2, СТ-2-48, СТ-2-48В, СТ-8, СТ-50, СТ-107 и других, питаемые от соответствующих аккумуляторных батарей. Преимущественное использование на самолетных стартерах получили электрощетки марки МГС5, описанные при рассмотрении автомобильного электрооборудования. Фактическая плотность тока в электрощетках самолетного стартера достигает тех же значений, которые приводились в табл. 9-27 для стартеров автомобилей.

Для приведения в действие многочисленных исполнительных механизмов современного самолета используется ряд серий электрических двигателей с естественным охлаждением закрытого или защищенного исполнения. Эти двигатели изготовляются на номинальное напряжение 20—28 В при мощности от долей ватта до нескольких десятков киловатт. Номинальная частота вращения списываемых двигателей лежит в пределах 2 000—24 000 об/мин при к. п. д. 0,3—0,6. Перечисленные здесь показатели реализованы в авиационных двигателях так называемого общего применения серии Д, серии МУ (моторы управления), серии МУК (моторы управления кратковременные), серии МА (моторы аэрофотоаппаратов), серии А, серий МГП, МП, МБП, МВ, ЭМ, СД и других [Л. 9-16]. Некоторые представления об отдельных машинах серий Д и МУ дает табл. 9-35, содержащая характеристики, с помощью которых принято описывать эти машины в соответствующих каталогах [Л. 9-17].

Особую группу электрических машин на современном самолете составляют преобразователи постоянного тока напряжением 27 В в постоянный ток другого напряжения и преобразователи постоянного тока в одно- и трехфазный переменный. Авиационные машинные преобразователи состоят из двигателей постоянного тока и генератора

Таблица 9-35

Характеристики некоторых типов авиационных электродвигателей самолетов Аэрофлота [Л.9-17]

Тип двигателя	Напряжение питания, В	Потребляемый ток, А	Частота вращения, об/мин	Режим работы	Момент на валу даН·см (кгс·см)	Высотность, км
Д5-ТР	26	2,1	—	—	90**	—
Д1-ТР(2 сер)	27	2,6	13 000±10%	Повторно-кратковременный	125**	20
Д-20	27	2,0	9 300±10%	Продолжительный	250**	10
Д-38Т	27	3,5*	10 000±10%	Повторно-кратковременный	400**	—
Д-90	27	9,0*	7 500±10%	»	—	20
Д-100	27	5,8*	5 800±600	Продолжительный	1,28	15
Д-2500А	24	170	2 300±230	Повторно-кратковременный	10,7	12
Д-3000М	27	185*	2 300	Кратковременный	130	17
Д-4500К	27	160	4 500	0,5—1 ч	65	12
МУ-30	27	5,5*	7 500	Повторно-кратковременный	520**	—
МУ-50	27	6,5*	7 000	»	1,04	—
МУ-55	27	2,2*	7 050	»	—	—
МУ-320	27	10	6 200	—	1,77	—
МУ-431	24	32*	5 000	Повторно-кратковременный	7,78	—
МУ-432	24	32*	5 000±10%	»	7,78	—

* Не более.
** сН·см (гс·см).

постоянного или переменного тока, конструктивно объединенных в общем корпусе. Преобразователи постоянного тока в постоянный (радиоумформеры) имеют мощность до 300 Вт при частоте вращения якоря до 8 500 об/мин [Л. 9-17]. На этих машинах электрощетки используются на коллекторах как со стороны первичного тока (26—27 В), так и со стороны генераторов, где напряжение достигает 750 В. Преобразователи постоянного тока в переменный бывают двух родов. Одни из них генерируют однофазный ток напряжением 115 В, а другие — трехфазный ток напряжением 36 В (частота во всех случаях 400 Гц). Преобразователи серии ПО перекрывают диапазон мощностей 0,25—6 кВт при частоте вращения якоря 8 000—12 000 об/мин. Предельная мощность преобразователей серии ПТ трехфазного тока достигает 3 кВт при той же частоте вращения якоря. На преобразователях переменного тока общее количество электрощеток, естественно, снижено, поскольку они используются главным образом на коллекторе со стороны двигателей. На контактных кольцах генераторов их применение сведено к минимуму.

Анализируя сведения, касающиеся электрооборудования самолетов гражданского воздушного флота, можно обнаружить, что как по своему назначению, так и по режимам работы, характеризуемым видами нагрузочных диаграмм, самолетные электрические машины являются аналогами машин, встречающихся в других отраслях техники. Основным показателем, отличающим работу самолетного электрооборудования, является высотная атмосфера, в которой эксплуатируются летательные аппараты.

Очевидно, что при подобных обстоятельствах для обеспечения нормальной работы элементов скользящего контакта самолетных электрических машин необходимо располагать соответствующим ассортиментом электрощеток. Помимо упоминавшихся несколько ранее изделий марок МГС7, МГС7И и МГС8 для использования в рассматриваемых условиях эксплуатации оказываются пригодными изделия марок А5, А6, А8, А9, А10, А12, А13, А15, А16 и некоторые другие. Изделия перечисленных марок изготовляются из электрощеточных материалов, подвергнутых соответствующей технологической обработке, в результате которой они приобретают способность удовлетворительно работать в высотной атмосфере. Характеристики электрощеток материалов, используемых при изготовлении щеток для электрооборудования самолетов гражданского воздушного флота, приведены в табл. 9-36.

Описанный способ придания высотных свойств электрощеточным материалам широко используется также в промышленности Англии. Обработка электрощеток, применяемая на предприятиях фирмы «Морганайт», заключается главным образом во введении в них пропитывающих веществ. Вид пропитывающего вещества опреде-

Таблица 9-36

Характеристики щеточных материалов, предназначенных для использования на электрических машинах самолетов Аэрофлота

Марка	Наименование характеристик					
	Номинальная плотность тока, А/см², не более	Максимально допустимая окружная скорость, м/с	Удельное нажатие, гПа (гс/см²)	Переходное падение напряжения, В	Коэффициент трения	Высотность, км
А5	20	19	750	2,8	0,12	12
А6	15	15	250	0,9	0,14	12
А8	15	15	250	1,4	0,13	15
А9	10	15	250	2,5	0,12	12
А10	15	15	250	1,6	0,14	12
А12	24	15	600	1,4	0,14	15
А13	100	19	950	2,0	0,14	12
А15	13	15	300	2,7	0,13	12
А16	15	40	400	2,7	0,12	15
МГС7	27	55	400—600	1,9	0,15	18
МГС7И	27	55	400—600	1,9	0,16	20
МГС8	28	55	400—600	2,4	0,15	18

ляет высоту, на которой могут эксплуатироваться электрощетки. Так, например, изделия, пропитанные галогенидами, эффективно работают на высоте до 12 км. При использовании в качестве пропитывающего вещества некоторых органических соединений потолок увеличивается до 16,5 км. Факт введения в электрощетки пропитывающих веществ, придающих им высотные свойства, фирма «Морганайт» отражает путем нанесения на них дополнительной маркировки буквами «КА», «КС» и «НАМ». Эти литеры ставятся перед товарным знаком фирмы [Л. 9-10, 9-18]. Таким образом, электрощетки фирмы «Морганайт» марки ЕС11, содержащие органическую пропитку, позволяющую использовать их на высоте до 16,5 км, будут снабжены маркировкой KCEG11. Электрощетки названной марки предназначаются главным образом для самолетных генераторов. Для этой же цели равно как и для самолетных двигателей фирма «Морганайт» производит пропитку электрощеток марок EG12, EG14, СМ6 и Н100. Технические характеристики перечисленных марок электрощеточных материалов до введения в них пропитывающих веществ приводились в табл. 9-14, 9-18, 9-22 и 9-24. После введения пропитывающих веществ происходит повышение переходного па-

дения напряжения. Самолетные стартеры фирма «Морганайт» снабжает электрощетками марок СМ9, DM4A, DM4D, DM100 и АМ3632А, характеристики которых были описаны ранее, при рассмотрении щеток электрических машин автомобилей.

Среди других стран, электроугольные предприятия которых сообщают в своих каталогах о выпуске щеток для авиационного электрооборудования, находятся ЧССР и Японии. Сведения о выпускаемых в этих странах электроугольных изделиях рассматриваемого назначения ограничены следующими данными (табл. 9-37):

Таблица 9-37

Параметр	Страна-изготовитель		
	ЧССР		Япония
Марка электрощеток	ZnL7	ZnL8	CH1251
Классификационный индекс (табл. 1-2)	—	—	IVB
Назначение	Генераторы, двигатели		Генераторы
Высотность, км	15	15	—
Номинальная плотность тока, А/см²	24	24	10
Максимальная окружная скорость, м/с	47	47	30—50
Удельное нажатие, гПа (гс/см²)	200—250	200—250	—
Удельное электрическое сопротивление, Ом·мм²/м	5—9	8—16	11
Твердость по Бринеллю, 10^7 Па (кгс/мм²)	23—38	21—33	—
Предел прочности при сжатии, 10^3 гПа (кгс/см²)	—	—	465
Переходное падение напряжения, В	2,6	2,9	2,2
Коэффициент трения	0,25	0,25	0,26

Новейшим достижением в области обеспечения нормальной работы элементов электрического скользящего контакта на высотах более 20 км является создание электрощеток, содержащих дисульфид молибдена (MoS_2). Это вещество вводится в основную массу электрощеточного материала двояким способом: либо в виде равномерно распределенных по объему электрощетки компонентов, либо в виде стержней (пробок), одним своим концом располагающихся на контактной поверхности

электроугольного изделия. Электрощетки, изготовляемые по последнему из описываемых способов, фирма «Морганайт» маркирует дополнительной литерой «Р», которая наносится на изделия слева от товарного знака [Л. 9-18]. В отечественной промышленности задача повышения высотности электрощеток решается как за счет использования дисульфида молибдена, так и некоторыми другими способами. Реализуя эти способы, отечественные предприятия изготавливают электрощетки, обеспечивающие удовлетворительную работу узла токосъема электрических машин, эксплуатируемых на высотах более 20 тыс. м и имеющих следующие характеристики:

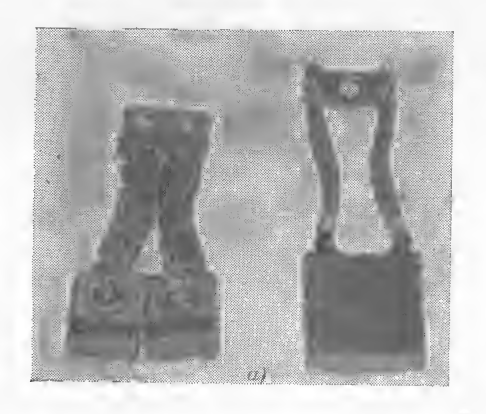
Марки электрощеток	ВТ5	ВТ7	ВТ-10	Г24
Высотность, м	25 000	25 000	30 000	30 000
Номинальная плотность тока, А/см²	—	30	25	30
Максимальная окружная скорость, м/с	—	60	45	60
Удельное сопротивление, Ом·мм²/м	35—65	16—36	25—45	17—35
Переходное падение напряжения, В	1,5—2,7	1,2—2,7	1,1—2,4	1,3—2,5
Коэффициент трения не более	0,22	0,20	0,20	0,25

Конструктивное оформление электрощеток самолетного электрооборудования показано на рис. 9-4. Их наиболее распространенные размеры таковы:

Тангенциальный размер	4—5—6,5—8—10 мм
Осевой размер	6,5—8—10—16—20—25 мм
Радиальный размер	12,5—16—20—25—32 мм

Электроугольные изделия отечественного производства, предназначенные для установки на генераторах, изготовляются реактивными типа К11-3, К18-2 и К20 (ГОСТ 12232-66). Изделия прочих назначений изготавливаются радиальными типа К4-2, К8, К8-3 и К8-4 (ГОСТ 12232-66).

Электрощетки для электрических машин горной промышленности. Современные способы добычи полезных ископаемых требуют проведения подземных (шахтных) горных работ, открытых горных работ и работ по бурению скважин. Комплексы оборудования, обслуживающие перечисленные виды работ и требующие для своего функционирования применения электрических машин со щетками, включают в себя подъемные машины, насосы, вентиляторы, компрессоры, экскаваторы, землесосные снаряды, драги, транспортные системы и буровые станки. Выбор приводных машин для перечисленных комплексов определяется имеющимся в отечественной промышленности опытом их эксплуатации. Этот опыт свидетельствует о том, что в случае применения регулируемых электроприводов производительность горных механизмов повышается на 10—15% по сравнению с нерегулируемыми. Регулируемый электропривод механизмов для разру-



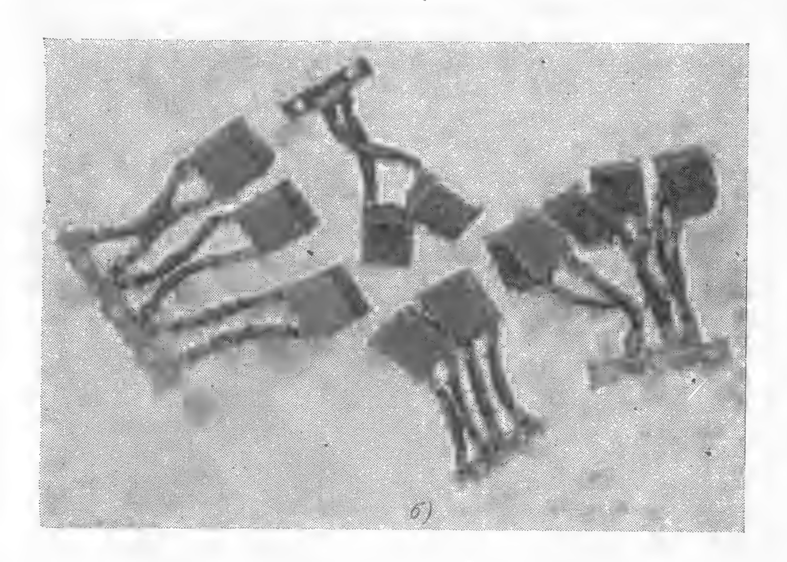


Рис. 9-4. Щетки для электрических машин самолетов Аэрофлота.
а — стартерные; *б* — генераторные.

шения горных пород (угольные комбайны, экскаваторы, буровые установки) позволяет создавать оптимальные режимы резания. С введением регулируемого электропривода значительно уменьшаются динамические перегрузки горных машин и механизмов, в результате чего существенно повышается их надежность. Изложенные обстоятельства объясняют распространение в горнодобывающей промышленности электрических машин, снабженных электрощетками, и делают необходимым рассмотрение вопроса о выборе марок материалов для изготовления последних.

При шахтном способе ведения горных работ основными агрегатами, требующими применения двигателей с электрощетками, являются подъемные машины, насосы, вентиляторы, компрессоры и рудничные электровозы.

Привод шахтных подъемных установок в наиболее сложных случаях работает по системе Г—Д или УВР—Д. В первом случае в состав установки входят синхронный или асинхронный двигатель, генератор и двигатель подъемной машины; во втором — управляемый выпрямитель и двигатель. Контактные кольца синхронных и асинхронных машин изготавливаются из бронзы, чугуна и стали. На машинах с бронзовыми контактными кольцами применяются электрощетки марок Т2, ЭГ4 и ЭГ14. Изделия двух последних марок встречаются также на машинах со стальными кольцами; машины, снабженные контактными кольцами из чугуна, оборудуются электрощетками марок Т2, ЭГ4, ЭГ14, Г3, МГ и МГ2. Электрооборудование постоянного тока преобразовательных агрегатов шахтной подъемной установки ранее комплектовалось машинами серий ПБК и ДПП, а в последнее время машинами единой серии П. В частности, для безредукторного привода этой установки, питаемого по системе УВР—Д, в серии П, предназначены компенсированные закрытые двигатели 21-го габарита, обладающие следующими характеристиками:

Таблица 9-38

Тип	Мощность, кВт	Напряжение, В	Частота вращения, об/мин
П21-60-5К	490	440	25
П21-45-5К	715	600	50
П21-60-5К	710	600	40
П21-60-5К	925	750	50

Крупные машины единой серии П следует оборудовать электрощетками марок ЭГ14 и ЭГ74. Эти же марки могут быть рекомендованы и для машин серий ПБК и ДПП.

Выбор приводных двигателей насосов, вентиляторов и компрессоров определяется мощностью установки. При мощности до 250 кВт обычно используется асинхронный двигатель с фазным ротором, при более высоких мощностях используется синхронный двигатель. Выбор марок электрощеток для них определяется материалом контактного кольца и вполне аналогичен только что рассмотренному способу решения этой задачи для двигателей переменного тока шахтных подъемных машин.

Тяговые двигатели рудничных электровозов оборудуются электроугольными изделиями марок ЭГ2А и ЭГ14. Эта рекомендация распространяется как на аккумуляторные, так и на троллейные электровозы. На открытых горных работах электрооборудование, требующее применения электрощеток, размещено на экскаваторах, отвально-перегрузочных мостах и транспортирующих механизмах. Наиболее сложные условия работы имеют место на экскаваторах, поэтому предназначаемое для них основное электрооборудование изготавливается в специальном (экскаваторном) исполнении. Машины этого исполнения образуют три серии: ДПЭ, МПЭ и ПЭ. Машины серии ДПЭ применяются в качестве приводных двигателей главных механизмов экскаваторов средней производительности. Они разработаны на базе краново-металлургической серии ДП и отличаются от них конструктивными элементами привязки к механизмам и обмоточными данными. Машины серии ПЭ разработаны на базе общепромышленной единой серии П и отличаются от них повышенной механической прочностью и обмоточными данными. Помимо перечисленного для применения на экскаваторах изготавливаются электрические машины индивидуального исполнения серии МПЭ и типов ПЭ-200, ПЭ-100 и ПЭ-400. Во всех перечисленных случаях нормальная эксплуатация электрооборудования обеспечивается применением электрощеток марок ЭГ4, ЭГ2А, ЭГ14 и Г3. В тех случаях, когда перечисленные изделия не обеспечивают нормальной работы деталей узла токосъема, рекомендуется переходить к использованию электрощеток марок 611М (вместо Г3 и ЭГ4) и ЭГ74 (вместо ЭГ2А и ЭГ14). Эта рекомендация остается справедливой

и для машин, установленных на отвально-перегрузочных и транспортирующих механизмах.

Эксплуатационные свойства щеток, используемых на электрических машинах горнодобывающей промышленности, изучались выборочно путем проведения соответствующих испытаний на отдельных горнодобывающих предприятиях. В результате этих испытаний установлено, что параметры кривой распределения скорости и изнашивания щеток на шахтном электрооборудовании оказались следующими (табл. 9-39):

Таблица 9-39

Объект испытания	$\bar{v}_{щ}$, мм/1000 ч	$\sigma_{vщ}$
Генератор преобразовательных агрегатов шахтного скипового подъема при использовании электрощеток марки ЭГ2А	3,2	0,1
То же при использовании электрощеток марки ЭГ4	2,0	0,1
Синхронный двигатель вентилятора при использовании электрощеток марки ЭГ14	1,4	—
Синхронный двигатель компрессора при использовании электрощеток марки ЭГ2А	1,7	—

Результаты эксплуатационных испытаний щеток на электрических машинах многоковшового роторного экскаватора и отвального перегружателя представлены в табл. 9-40. Данные описанных испытаний дают основание заключить, что значение средних скоростей изнашивания электрощеток на рассмотренных машинах не превышает тех, которые характерны для электрощеток машин, эксплуатируемых в других отраслях народного хозяйства.

Все упомянутые ранее механизмы горнодобывающей промышленности не создавали специфических особенностей для работы деталей узла токосъема. Принципиально по-другому обстоит дело в приводных системах электробуров. В современных конструкциях этих механизмов в качестве привода используется маслонаполненная электрическая машина постоянного тока, применение которой значительно упрощает систему подведения энергии к механизму и разрешает проблему регулирования частоты вращения исполнительного инструмента — доло-

Таблица 9-40

Оценка эксплуатационных свойств щеток, используемых на электрических машинах многоковшового роторного экскаватора и отвального перегружателя

Сведения об электрических машинах				Эксплуатационные свойства электрощеток			
Назначение	Тип	Мощность, кВт	Частота вращения, об/мин	Марка электрощеток	Степень искрения	Скорость изнашивания, мм/1 000 ч: Номинальное значение $\bar{v}_{щ}$	Скорость изнашивания, мм/1 000 ч: Среднее квадратическое отклонение $\sigma_{vщ}$
Электрооборудование экскаватора							
Генератор системы Г—Д роторного колеса	G84/37/8*	780	1 485	4011*	1—1/4	13,0	2,5
				ЭГ2А	1—1/4	3,3	0,4
				ЭГ74	1—1/4	2,3	0,6
Генератор подъемной лебедки роторного колеса	G116*	410	1 485	4011*	1—1/4	4,1	0,6
				ЭГ2А	1—1/4	2,7	0,3
Генератор ходового устройства	G2117*	400	1 480	4011*	1	5,6	0,5
				ЭГ2А	1	3,3	0,4
Генератор поворотного механизма	G295*	145	1 480	4011*	1	2,1	0,5
				ЭГ2А	1	1,4	0,3
Двигатель роторного колеса	GRF264/47/4*	350	1 000/1 280	4011*	1 1/4	2,3	0,4
				ЭГ74	1 1/4	1,8	0,4
				ЭГ2А	1 1/4	1,6	0,3
Двигатель конвейеров	AFM200/6M*	200	990	МГО	1	1,9	0,2
Двигатель подъемной лебедки	GRF254/60/4*	180	750	4011*	1	6,4	1,5
				ЭГ74	1	3,4	0,5

Продолжение табл. 9-40

Сведения об электрических машинах				Эксплуатационные свойства электрощеток			
Назначение	Тип	Мощность, кВт	Частота вращения, об/мин	Марка электрощеток	Степень искрения	Скорость изнашивания, мм/1 000 ч	
						Номинальное значение $\bar{v}_{щ}$	Среднее квадратичное отклонение $\sigma_{vщ}$
Двигатель поворотного механизма	GHF244/38	9,6/60	1 000/160	4011*	1	0,9	0,1
				ЭГ74	1	1,0	0,2
				ЭГ2А	1	1,1	0,4
Двигатель ходового механизма	GH244/43*	50/11	1 000/200	4011*	$1^1/_4$	1,8	0,2
				ЭГ2А	$1^1/_4$	1,8	0,5
Двигатель поворотного механизма отвального конвейера	GKOF269*	7,5	1 200	ЕС3397В*	1	0,3	—
				ЭГ2А	1	0,5	—
Возбудитель генератора роторного колеса	E245*	3,5	1 485	ЕС3397В*	1	2,1	0,3
				ЭГ74	1	1,5	—
Двигатель демпферной машины поворотного механизма	GM20п*	2,6	2 000	ЕК-2*	1	1,8	—
				ЭГ2А	1	0,9	0,01
Двигатель демпферной машины роторного колеса ходовой лебедки	GMA1,5*	0,27	2 000	Е43*	1	1,3	—
				ЭГ74	1	0,9	0,2
Электрооборудование перегружателя							
Привод конвейера	AVM315/6M*	250	987	RC70*	1	2,8	0,2
				МГО	1	1,9	0,1
				МГО	1	2,2	0,5

Продолжение табл. 9-40

Сведения об электрических машинах				Эксплуатационные свойства электрощеток			
Назначение	Тип	Мощность, кВт	Частота вращения, об/мин	Марка электрощеток	Степень искрения	Скорость изнашивания, мм/1 000 ч	
						Номинальное значение $\bar{v}_{щ}$	Среднее квадратичное отклонение $\sigma_{vщ}$
Главный генератор дизельной установки	ДСК4/145а	145	1 500	RE-59*	1	1,1	0,2
Двигатель ходового устройства	AM80/6P	56	980	МК65*	1	2,8	0,2
				611М	1	2,0	0,2
Двигатель кабельного барабана	AM38в/6	7,0	1 000	МК65*	1	1,4	0,09
				611М	1	0,7	0,2
				МГ64	1	0,7	0,2
Генератор дизельного агрегата кабельной тележки	4/100K	100	1 500	RE-59N*	1	1,3	0,2
Генератор поворотного механизма отвального конвейера	G259*	10,2	1 480	4011*	1	1,0	0,1
				ЭГ14	1	0,7	—
Двигатель ходового устройства конвейерной станции	AM160L6R*	7,5	965	МК65*	1	1,3	0,3
				МГО	1	0,9	0,2

Изделия (машины, электрощетки) зарубежного производства.

та. Наличие внутри машины жидкого диэлектрика, находящегося под значительным гидростатическим давлением, представляет особенность работы скользящего контакта этих машин. Упомянутая особенность состоит в том, что работа контакта должна происходить без искрообразования при совершенно темной коммутации, поскольку нарушение этого условия приводит к разложению диэлектрика, подгару коллектора и значительному возрастанию скорости изнашивания электрощеток. Большая практическая значимость погружных электрических машин повлекла за собой расширение исследований скользящего контакта в среде жидкого диэлектрика [Л. 3-16—3-19, 6-11]. Обобщение упомянутых исследований, равно как и других работ рассматриваемого направления, позволяет сформулировать некоторые общие закономерности, влияющие на характеристики и эксплуатационные свойства контакта в среде жидкого диэлектрика. В самом общем виде можно заключить, что большинство показателей скользящего контакта погружных машин качественно не отличаются от тех, которые характерны для машин, эксплуатируемых в воздушной атмосфере. Подобное заключение относится к фактической продолжительности периода коммутации, различиям в ходе коммутационного процесса под электрощетками различной полярности, виду вольт-амперных характеристик, характеру токораспределения между параллельно работающими электрощетками, влиянию нажатия и некоторым другим процессам и явлениям. Практическими выводами из описанных исследований, оказывающими влияние на выбор и условия эксплуатации щеток для погруженных электрических машин, являются следующие: а) при замене воздушной среды средой трансформаторного масла ширина зоны безыскровой работы машины постоянного тока существенно возрастает; б) удельное нажатие на электрощетки должно быть повышено и в зависимости от марки их материала и окружной скорости коллектора доведено до 2—5 10^3 гПа (кгс/см²); в) электрощетки должны снабжаться декомпрессионными каналами; г) используемое для заполнения машины масло должно обладать возможно меньшими вязкостью и маслянистостью; д) межламельные пространства коллекторов подлежат обязательному продораживанию, а размеры электрощеток следует выбирать возможно меньшими.

При выполнении перечисленных рекомендаций для погружных электрических машин могут быть использованы серийные электрощеточные материалы (ГОСТ 2332-63). В [Л. 6-11] сообщается о результатах испытаний маслонаполненной машины, коллектор которой был изготовлен из стальных пластин, а электрощетки из материала марки МГСО. Работа машины протекала нормально и средний износ электрощеток после 3 000 ч составил 1,2 мм.

В зарубежной практике работа электрических машин горнодобывающей промышленности также обеспечивается за счет использования неспециализированных щеток. Так, например, фирма «Ле Карбон Лоррен» (Франция) рекомендует для электрооборудования горных механизмов применять электрощетки марок EG97, EG98, EG99, EG97B, EG98B и EG99B, характеристики которых приводились в табл. 9-14. Для шахтных подъемников рекомендованы щетки марок E5, E8, E13 (ГДР), EG236 (Англия), TG501 (Япония), RE12, RE56 и 1090V (ФРГ). Характеристики в области применения большинства перечисленных электрощеток приводились ранее.

Щетки для электрических машин предприятий химической промышленности. Когда атмосфера не загрязнена посторонними примесями, нагретая поверхность коллектора поглощает из воздуха кислород, который вместе с кислородом, образовавшимся электролитически, диффундирует под слой политуры и окисляет медь. Истирание электрощетками слоя политуры и процесс его образования находятся в динамическом равновесии, обеспечивающем нормальное функционирование скользящего контакта электрических машин.

Появление в окружающей атмосфере химически активных компонентов изменяет характер протекания описанных процессов. Как уже отмечалось ранее, если в атмосфере окажется сероводород, то в составе политуры появится сернистая медь. Хотя последняя и является более электропроводной, чем CuO и Cu_2O, но благодаря большей толщине образующегося слоя и лучшей его связанности с материалом коллектора нормальная работа машины нарушается. В литературе описан случай, когда для восстановления работоспособности электрической машины в подобных условиях ее коллектор был сделан из железных пластин, поскольку железо пассивно к сероводороду [Л. 2-3]. Если в составе атмосферы окажется

хлор, то при соединении с влагой он образует соляную кислоту, которая энергично счищает политуру, при этом на контактной поверхности катодно-поляризованной электрощетки начнет отлагаться медь, а рабочая поверхность коллектора приобретает светлую окраску. Такую же окраску приобретает коллектор при наличии в атмосфере аммиака. Эти обстоятельства оказывают самое непосредственное влияние на выбор электроприводов, применяемых на предприятиях химической промышленности, и этот выбор определяется характером их производства. Когда по условиям производства происходит загрязнение атмосферы химически активными парами, газами и их пылью (производства: нефтеперерабатывающие, синтетического спирта и каучука, азотное и т. п.), при выборе электроприводов приходится применять электрические машины с соответствующей защитой. Подобное обстоятельство привело к тому, что в перечисленных производствах почти исключительное применение получили нерегулируемые приводы переменного тока на базе синхронных или асинхронных короткозамкнутых двигателей. Первые применяются, как правило, для привода мощных турбо- и поршневых компрессоров; вторые — для привода насосов. Электропривод предприятий по переработке пластмасс и полимерных материалов по условиям протекания производственных процессов должен обеспечивать регулирование скорости технологического оборудования и не требует взрывозащитного исполнения. В данных условиях применяют машины постоянного тока. Аналогичные машины применяются на предприятиях резинотехнической и шинной промышленности, технологическое оборудование которых представлено сложными многоагрегатными линиями, оснащенными многодвигательными приводами, имеющими упругую связь через обрабатываемый материал.

Выбор щеток для контактных колец электрических машин описывался ранее (на стр. 151—160, 171—173 и в табл. 9-3, 9-18). Машины постоянного тока в отечественной химической промышленности оборудуются главным образом электрощетками марок ЭГ4, ЭГ14 и в меньшей мере 611М и ЭГ2А. Последние рекомендации справедливы для случаев, когда, как это следует из условия применения незащищенных электрических машин постоянного тока, атмосфера, в которой они эксплуатируются, свободна от вредных примесей. При несоблюдении указанного условия нормальная работа узла токосъема при использовании электрощеток перечисленных марок может нарушаться. Для того чтобы восстановить их нормальную работу, окружающую среду необходимо привести в состояние, предусмотренное проектом, т. е. освободить от вредных примесей.

Зарубежные фирмы в своих информациях также не выделяют щеток, предназначенных специально для электрооборудования химических предприятий. Только в отдельных случаях можно встретить указание на то, что те или иные марки электрощеточных изделий могут использоваться в загрязненной атмосфере. К числу таких марок относятся РМ50 (Англия): Е4550, Е4647 (ФРГ); TG221, CH235 (Япония).

Щетки для коллекторных электрических машин переменного тока. Ранее освещались методы обеспечения нормальной работы скользящего контакта электрических машин, используемых в различных отраслях промышленности и на транспорте. Приведенные рекомендации сформулированы на основе обобщения опыта эксплуатации электрооборудования в соответствующих условиях, и они могут быть перенесены на случаи использования машин с аналогичными режимами работы и условиями применения. Здесь отступим от ранее использованной схемы рассмотрения способов обеспечения работы узла токосъема электрических машин, применяемых в отдельных отраслях промышленности, и решим эту задачу по отношению к одному классу машин, применяемых в ряде отраслей народного хозяйства. Имеется в виду чрезвычайно обширный и многообразный класс коллекторных электрических машин переменного тока мощностью от долей киловатта до нескольких сот киловатт, а в последнее время до 1 500—2 000 киловатт [Л. 9-19]. В рассматриваемый класс машин входят: универсальные однофазные двигатели последовательного возбуждения; репульсионные двигатели с двумя обмотками на статоре; репульсионные двигатели с одной обмоткой на статоре и одним комплектом электрощеток (двигатели Томпсона); репульсионные двигатели с одной обмоткой на статоре и двумя комплектами электрощеток (двигатели Дери); трехфазные шунтовые двигатели с двойным комплектом электрощеток (двигатели Шраге — Рихтера); трехфазные коллекторные двигатели последовательного возбуждения; трехфазные компенсированные двигатели; фазокомпенса-

торы; каскадные соединения асинхронных и коллекторных машин (каскады Кремера, Шербиуса); многофазные коллекторные генераторы.

Целесообразность применения коллекторных машин переменного тока определяется возможностью осуществления широкого, плавного и экономичного регулирования частоты вращения при постоянной частоте питающей сети (при работе их двигателями) и возможностью получения напряжения регулируемой частоты при постоянной частоте вращения (при работе их генераторами).

В конструктивном отношении коллекторные машины переменного тока оказываются несколько более сложными, чем машины других типов. Усложнения касаются магнитных систем, статорных и роторных обмоток и щеточно-коллекторного узла. Для того чтобы между краями электрощеток не возникало значительных напряжений, их приходится делать сравнительно узкими, так чтобы перекрытие коллекторных пластин составляло 1,5—1,8. Подобное обстоятельство приводит к увеличению числа устанавливаемых на машине электрощеток. Кроме того, в некоторых типах машин приходится создавать устройства для изменения положения электрощеток на коллекторе. Перечисленные обстоятельства в течение длительного периода тормозили распространение машин рассматриваемого класса. Однако в последнее десятилетие, благодаря проработке теоретических основ их действия и обобщению опыта эксплуатации, наметилась тенденция к более широкому распространению этих машин в промышленности [Л. 9-19]. Соответственно большой практический интерес приобретают вопросы подбора для них электрощеток.

Из теории работы коллекторных машин переменного тока известно, что в замкнутых электрощетками секциях якоря возникают трансформаторные э. д. с., создаваемые пульсирующим полем машины и круговым вращающимся полем. Возникновение названных э. д. с., накладывающихся на э. д. с., свойственные обычным машинам постоянного тока, существенно осложняет протекание коммутационного процесса машин переменного тока, и для обеспечения их нормальной работы создаются специальные электрощеточные материалы. Перечень подобных материалов и рекомендаций по их использованию изложены в табл. 9-41.

Таблица 9-41

Характеристики электрощеточных материалов, предназначенных для использования на коллекторных машинах переменного тока

Марка	Классификационный индекс (табл. 1-2)	Характеристики материала								Область применения
		Номинальная плотность тока, А/см²	Максимальная окружная скорость, м/с	Удельное нажатие, гПа (гс/см²)	Удельное сопротивление, Ом×мм²/м	Плотность, г/см³	Твердость по Шору	Переходное падение напряжения, В	Коэффициент трения	
СССР										
Т2	IIБ	6	10	200—250	50	1,62	—	1,9	0,30	Коллекторные двигатели напряжением 110—220 В с затрудненной коммутацией и низкой частотой вращения
Г4	—	5	30	200—500	10—25	—	4—15*	⩽2,0	⩽0,30	Двигатели бытовых приборов
Г22	IIIВ	10	30	400	160—230	—	12—55*	⩾2,2	⩽0,25	Двигатели Шраге-Рихтера и двигатели постоянного тока малой мощности с затрудненными условиями коммутации
Г26	IIIВ	10	35	180—250	80—150	—	9—25*	2,0—4,1	⩽0,26	Двигатели Шраге-Рихтера с низким значением трансформаторной э. д. с. Возможно использование на двигателях бытовой техники
Г30	IIIВ	10	35	180—250	170—320	—	7—24*	3,0—5,0	⩽0,26	Двигатели Шраге-Рихтера со средним значением трансформаторной э. д. с.
ЭГ8	IVВ	12	40	200—400	39	1,64	10—45*	2,6	0,15	Коллекторные двигатели с большой частотой вращения
ЭГ17	IVБ	2	15	200—300	8—15	—	11—35*	2,6	0,23	Двигатели электрических бритв
ГДР										
К4	IIБ	7	20	—	39	1,55	60	2,0	0,50	Универсальные маломощные двигатели ручного электроинструмента и бытовых приборов
К5	IIБ	7	20	—	39	1,50	55	2,3	0,40	Двигатели кассовых аппаратов и бормашин

Продолжение табл. 9-41

Марка	Классификационный индекс (табл. 1-2)	Характеристики материала: Номинальная плотность тока, А/см²	Максимальная окружная скорость, м/с	Удельное нажатие, гПа (гс/см²)	Удельное электросопротивление, Ом·мм²/м	Плотность, г/см³	Твердость по Шору	Переходное падение напряжения, В	Коэффициент трения	Область применения
K6	IIБ	8	20	—	34	1,60	75	2,1	0,50	Та же, что у марки K4
K7	IIБ	6	20	—	400	1,60	65	—	0,50	Та же, что у марки K5
G4	IIA	8	30	—	150	1,80	30	4,5	0,15	Коллекторные двигатели трехфазного тока, питаемые со стороны ротора или статора
G8	IIIB	7	40	—	170	1,80	23	4,7	0,16	Та же, что у марок K4 и K5
G11	IIA	10	40	—	25	1,55	40	2,0	0,30	Та же, что у марок K4 и K5
G18	IIIB	12	20	—	250	1,30	23	5,5	0,20	Та же, что у марки G4
E26	IVB	12	50	—	58	1,50	45	3,6	0,20	Та же, что у марок K4 и K5
M21	IД	12	40	—	11	2,80	28	2,3	0,20	Та же, что у марок K4 и K5
							ЧССР			
T3	IIБ	6	15	175—200	60—70	1,50	57—70	2—3	0,15—0,30	Универсальные маломощные двигатели бытовых электроприборов
G3	IIA	6	50	175—200	70—130	1,60—1,80	7—13**	4,0	0,30	Коллекторные машины переменного тока
EK58	IVB	10	35	180	36—62	1,64—1,75	28—60**	3,6	0,20	Коллекторные машины трехфазного тока
							ПНР			
W25	IIA	8	25	220	25—40	1,4—1,6	25—45	1,4—2,2	0,25	Универсальные маломощные двигатели ручного электроинструмента, бытовых электроприборов, электромузыкальных инструментов
W50	IIБ	7	25	220	50—70	1,5—1,7	40—55	1,8—2,3	0,25	Та же, что у марки W25, и однофазные стационарные машины переменного тока

Продолжение табл. 9-41

Марка	Классификационный индекс (табл. 1-2)	Характеристики материала: Номинальная плотность тока, А/см²	Максимальная окружная скорость, м/с	Удельное нажатие, гПа (гс/см²)	Удельное электросопротивление, Ом·мм²/м	Плотность, г/см³	Твердость по Шору	Переходное падение напряжения, В	Коэффициент трения	Область применения
G100	IIIB	6	25	220	90—130	1,6—1,8	10—20	2,5—3,8	0,25	Та же, что у марки W50, и стационарные машины трехфазного тока
G200	IIIB	5	30	220	150—250	1,8—2,0	3—15	4,4—5,5	0,20	Та же, что у марки G100, и шунтовые двигатели трехфазного тока
E17	IVБ	10	25	200	14—21	1,4—1,6	22—38	2,4—3,0	0,20	Коллекторные машины переменного тока
E22	—	10	25	220	15—28	1,5—1,7	25—43	2,6—3,2	0,22	Та же, что у марки E17
E28	IVБ	10	40	220	21—34	1,6—1,8	40—57	2,6—3,4	0,20	То же
E30	IIБ	10	40	220	26—40	1,5—1,8	35—57	2,4—3,0	0,23	» »
E35	IVB	10	40	220	30—46	1,6—1,8	40—55	2,2—2,9	0,24	Та же, что у марки E17, шунтовые двигатели трехфазного тока и каскады Крамера
E50	IVB	10	50	220	45—60	1,6—1,8	35—60	2,5—3,5	0,25	Та же, что у марки E17
E53	IVB	10	50	220	45—70	1,6—1,8	35—60	2,5—3,5	0,25	Универсальные маломощные двигатели ручного электроинструмента и бытовых электроприборов
M48	IД	15	25	200	1,4—3,8	3,0—3,2	14—30	1,30—1,90	0,23	Универсальные двигатели бытовых электроприборов (полотеры)
							Англия			
C4R	IIБ	6,5	20	140	—	—	—	1,4—2,4	>0,20	Сериесные двигатели однофазного тока
PM50	IIIB	6,5	30	210	160	—	—	2,4—3,6	0,15—0,20	Коллекторные двигатели переменного тока
PM75	IIIB	3,0	20	210	—	—	—	>3,6	>0,20	Универсальные маломощные двигатели ручного электроинструмента и бытовых электроприборов

Продолжение табл. 9-41

Марка	Классификационный индекс (табл. 1-2)	Характеристики материала: Номинальная плотность тока, А/см²	Максимальная окружная скорость, м/с	Удельное нажатие, гПа (гс/см²)	Удельное электросопротивление, Ом·мм²/м	Плотность, г/см³	Твердость по Шору	Переходное падение напряжения, В	Коэффициент трения	Область применения
PM85	IIIB	2,5	20	210	150	—	—	>3,6	>0,20	Та же, что у марки PM75
IM3	IIIB	6,5	30	210	140	—	—	2,4—3,6	<0,10	Та же что у марки PM75 и репульсионные двигатели
IM6	IIIB	2,5	30	210	760	—	—	>3,6	<0,10	Та же, что у марки PM75
IM6/2	—	2,5	20—25	210	—	—	—	>3,6	0,10—0,15	Репульсионно-индукционные двигатели
IM100	—	8,0	20—25	210	—	—	—	>3,6	0,10—0,15	Коллекторные двигатели переменного тока с питанием со стороны статора
IM102	—	6,5—9,0	30	210	—	—	—	>3,6	0,10—0,15	Коллекторные двигатели переменного тока с питанием со стороны статора и ротора и двигатели типа „Шраге"
					Франция					
DH	IIБ	6/7	20	—	50	—	70	2,3—3,0	>0,20	Универсальные маломощные двигатели ручного электроинструмента и бытовых электроприборов
450	IIБ	8	20	—	30	—	45—50	2,3—3,0	>0,20	Та же, что у марки DH
P1, P10	IIБ	5	15	—	65	—	71	2,3—3,0	>0,20	Коллекторные машины одно- и трехфазного тока
AH	IIБ	6/8	20	—	36	—	58	2,3—3,0	>0,20	Универсальные коллекторные двигатели
AS	IIБ	6	15	—	41	—	70	2,3—3,0	>0,20	
A5246	—	6	15	—	43	—	65	2,3—3,0	>0,20	
A5698	IIБ	6/8	20	—	40	—	60	2,3—3,0	>0,20	Универсальные коллекторные двигатели малой мощности
A5993	IIБ	6/8	25	—	40	—	60	2,3—3,0	>0,20	

Продолжение табл. 9-41

Марка	Классификационный индекс (табл. 1-2)	Характеристики материала: Номинальная плотность тока, А/см²	Максимальная окружная скорость, м/с	Удельное нажатие, гПа (гс/см²)	Удельное электросопротивление, Ом·мм²/м	Плотность, г/см³	Твердость по Шору	Переходное падение напряжения, В	Коэффициент трения	Область применения
QS	IIБ	6	15	—	60	—	75	2,3—3,0	>0,20	Многофазные коллекторные машины переменного тока
LFC62	IIIB	7	40	—	80—120	—	30	>3,0	0,12—0,20	Универсальные коллекторные машины однофазного тока, машины трехфазного тока и двигатели типа „Шраге"
BG28	IIIB	7	35	—	100—150	—	22	>3,0	0,12—0,20	
BG412	IIIБ	8	30	—	60	—	14	>3,0	0,12—0,20	
BG417	IIIБ	8	40	—	70	—	21	>3,0	0,12—0,20	
Z	IIIБ	8	20	—	30	—	45	2,3—3,0	>0,20	Малые универсальные двигатели переменного тока
EG30	IVБ	10	25	—	30	—	60	2,3—3,0	>0,20	Однофазные машины переменного тока
EG97, EG98, EG99	IVB	10	50	—	40	—	58—78	2,3—3,0	0,12—0,20	Коллекторные двигатели переменного тока
EG97B, EG98B, EG99B	IVB	10	50	—	36—43	—	60—70	2,3—3,0	0,12—0,20	Коллекторные двигатели переменного тока
EG306, EG316	IVB	10	50	—	48	—	50—55	3,0	0,12—0,20	Мощные коллекторные машины переменного тока
					Япония					
CH40	IVB	11	45	—	65	—	44	2,2	0,20	Универсальные маломощные двигатели ручного электроинструмента
CH45	IVB	12	50	—	68	—	44	2,2	0,20	Мощные коллекторные машины переменного тока
EGGS2	IVB	12	60	—	60	1,48	40	2,4	0,26	Та же, что у марки CH40, и двигатели бытовых электроприборов

Продолжение табл. 9-41

Марка	Классификационный индекс (табл. 1-2)	Номинальная плотность тока, А/см²	Максимальная окружная скорость, м/с	Удельное нажатие, гПа (гс/см²)	Удельное электросопротивление, Ом·мм²/м	Плотность, г/см³	Твердость по Шору	Переходное падение напряжения, В	Коэффициент трения	Область применения
TG3	IIIA	10	30	100—150	25	1,65	25	1,7	0,29	Коллекторные машины переменного тока
TG3A	IIIA	10	30	100—150	25	1,65	25	2,0	0,29	Коллекторные двигатели переменного тока, эксплуатируемые в загрязненных средах
TG227	IVB	12	50	150—250	46	1,54	52	2,6	0,25	Коллекторные двигатели переменного тока
TG302	IVБ	10	35	100—200	32	1,68	37	2,9	0,25	Малые коллекторные двигатели переменного тока
G98	—	5	10	200—400	1 000	1,20	27	5,0	0,28	Та же, что у марки TG302
ФРГ										
W, WP, W6	IIБ	4—5	15—20	200	150—200	1,55—1,60	60—80	2,0—3,9	0,20	Универсальные маломощные двигатели
RH36, RH37	IIБ	5	20	—	200—250	1,50—1,55	65—75	2,4—2,6	—	
RH94	IIБ	5	20	—	350	1,40	65	2,8	—	
RK86	IIIB	8	20	—	200	1,55	80	4,4	0,30	Универсальные двигатели, репульсионные двигатели и двигатели Дери
2021, 2065	—	7	35	200-250	110—220	1,80—1,90	50	2,8—3,0	0,20—0,32	Стационарные машины трехфазного тока
2088	IIA	10	35	200—250	180	1,68	25	3,1	0,30	Та же, что у марок 2021 и 2065
2199	IIA	10	35	200—250	160	1,70	35	3,2	0,18	Та же, что у марок 2021 и 2065, и коллекторные двигатели переменного тока параллельного возбуждения, питаемые со стороны статора

Продолжение табл. 9-41

Марка	Классификационный индекс (табл. 1-2)	Номинальная плотность тока, А/см²	Максимальная окружная скорость, м/с	Удельное нажатие, гПа (гс/см²)	Удельное электросопротивление, Ом·мм²/м	Плотность, г/см³	Твердость по Шору	Переходное падение напряжения, В	Коэффициент трения	Область применения
RE1	IVB	10	60	180	35	1,65	70	2,5	0,15	Стационарные машины переменного тока мощностью до 100 кВт
RE28	IVB	10	40	200—250	45	1,65	55	3,1	0,22	Стационарные машины трехфазного тока при высоких преобразуемых напряжениях
RE54	—	10	40	180—200	19	1,58	40	2,4	0,20	Приводные двигатели переменного тока бумагоделательных машин
GEE	IIA	6	20	140	46	1,55	32**	2,7	0,19	Двигатели переменного тока Дери
4247	—	—	—	—	40	1,65	80**	—	—	Универсальные маломощные двигатели вентиляторов, шлифовальных кругов, пылесосов, счетно-регистрирующих и швейных машин
4463	IIБ	—	—	—	35	1,60	48**	—	—	
4489	IIA	—	—	—	100	1,60	24**	—	—	
4692	—	—	—	—	150	1,60	48**	—	—	
4712	—	—	—	—	50	1,50	—	—	—	Универсальные маломощные двигатели, от которых требуется бесшумная работа (проигрыватели и др.)
F94	IIIA	10	30	200	100	1,80	—	3,7	0,08	Однофазные коллекторные машины переменного тока мощностью до 30 кВт и репульсионные двигатели

Марка	Классификационный индекс (табл. 1-2)	Характеристики материала: Номинальная плотность тока, А/см²	Максимальная окружная скорость, м/с	Удельное нажатие, гПа (гс/см²)	Удельное электросопротивление, Ом·мм²/м	Плотность, г/см³	Твердость по Шору	Переходное падение напряжения, В	Коэффициент трения	Область применения
F951	IIIA	10	30	200	190	1,90	32**	3,5	0,08	Коллекторные машины трехфазного тока
E4	—	6	20	140	45	1,45	24**	3,0	0,30	Однофазные машины переменного тока мощностью до 30 кВт
E1090V	IVB	10	30	200	55	1,55	38**	3,2	0,21	Коллекторные машины трехфазного тока и двигатели Дери
E1664X	IVБ	—	—	—	40	1,55	32**	—	—	То же, что и для марки 4247
E2027	IVA	12	40	180	35	1,57	25**	2,9	0,12	Однофазные коллекторные машины переменного тока напряжением 220 В и мощностью до 30 кВт
E3532	IVA	12	40	180	55	1,50	27**	2,7	0,14	Коллекторные машины переменного тока, питаемые со стороны статора
B2	IB	—	—	—	0,1	6,60	16**	—	—	Коллекторные двигатели весьма малой мощности

* Твердость по ГОСТ 9506-65

**Твердость по Бринеллю 10^7 Па (кгс/мм²).

Основное количество содержащихся в этой таблице марок электрощеточных материалов предназначено специально для машин переменного тока. Только отдельные из них, созданные для других областей применения, фирмы-изготовители считают возможным рекомендовать для применения в данных условиях. Для полноты картины эти, уже описанные ранее марки электрощеток перечислены и в табл. 9-41.

Среди описанных в табл. 9-41 электрощеточных материалов обращают на себя внимание материалы, обладающие весьма высокими значениями удельного электрического сопротивления ($\rho > 100$). Изготовленные из подобных материалов электрощетки предназначены главным образом для универсальных коллекторных машин малых мощностей. Ограниченные габаритные размеры и массы подобных машин исключают возможность устройства в них приспособлений, облегчающих коммутационные процессы, и требования к коммутирующим свойствам электрощеток со стороны этих машин оказываются наиболее жесткими. В соответствии с излагавшимися ранее соображениями о связях между коммутирующими способностями электрощеток и величиной удельного электрического сопротивления материала, из которого они изготовлены, две названные характеристики связаны прямой зависимостью. Вот почему для универсальных машин приходится изготавливать электрощетки с большими значениями ρ. Получение высокоомных электрощеточных материалов связано с использованием в технологии производства соответствующих связующих веществ, исключающих возможность проведения процессов электрографитации. Вот почему все эти материалы относятся ко II и III классам, устанавливаемым в соответствии с табл. 1-2. Однако поскольку материалы этих классов не в состоянии обеспечить удовлетворение всех требований, предъявляемых к электрощеткам современных крупных машин, во многих случаях приходится применять электрощеточные материалы IV класса, обеспечивая допустимый уровень коммутации за счет средств, закладываемых в машины.

Эксплуатационная оценка работы щеток на коллекторных электрических машинах переменного тока для ряда случаев их использования содержится в табл. 9-42, из которой следует, что при правильном подборе марок электроугольных изделий работа щеточно-коллекторного

Таблица 9-42

Оценка эксплуатационных свойств электрощеток, используемых на коллекторных машинах переменного тока

Сведения об электрических машинах					Эксплуатационные свойства электрощеток			
Назначение	Тип	Мощность, кВт	Напряжение, В	Частота вращения, об/мин	Марка электрощеток	Степень искрения	Скорость изнашивания, мм/1 000 ч: Номинальное значение $\overline{v}_{vщ}$	Скорость изнашивания, мм/1 000 ч: Среднее квадратическое отклонение $\sigma_{vщ}$
Двигатель системы Шраге—Рихтера, используемый в качестве привода трубочной машины	RDN-226/20-4*	35	500	2 200	2065* Г21	1 1	1,7 0,8	0,5 0,3
То же, но используемый в качестве привода дноклейного агрегата трубочной машины	RDN-166/4-4*	7,5	500	2 300	G9* Г30	1 1/4 1 1/4	0,5 0,5	0,1 0,1
То же, но используемый в качестве привода двойного отклада трубочной машины	RDN-126/7-4*	8,0	500	2 200	BG530* Г30	1 1/4 1 1/4	1,3 0,9	0,3 0,1
То же, но используемый в качестве привода бобинорезательного станка	MGC-334*	9,6	500	2 345	EG97* Г30	1 1	1,4 1,1	0,6 0,7
То же, но используемый в качестве привода транспортера	RDN-146a/10-4*	6,0	500	2 200	G9* Г20	1 1/4 1 1/4	0,3 0,5	0,1 0,1
То же, но используемый в качестве привода печи обжига	KB-53*	55	500	1 580	EG8101* Г20 Г21	1 1/4 1 1/4 1	4,9 0,7 1,1	0,9 0,2 0,4

Продолжение табл. 9-42

Сведения об электрических машинах					Эксплуатационные свойства электрощеток			
Назначение	Тип	Мощность, кВт	Напряжение, В	Частота вращения, об/мин	Марка электрощеток	Степень искрения	Скорость изнашивания, мм/1 000 ч: Номинальное значение $\overline{v}_{vщ}$	Скорость изнашивания, мм/1 000 ч: Среднее квадратическое отклонение $\sigma_{vщ}$
То же, но используемый в качестве привода барабана вакуумфильтра	KB-22*	26	500	1 420	IM8876* Г21	1 1/4 1 1/4	0,3 0,5	0,2 0,1
То же, но используемый в качестве вспомогательного привода прокатного стана	T5436-E16	160	380	540	EG8565* Г20	1 1/4 1 1/4	0,7 0,7	0,2 0,1
То же, но используемый в качестве привода прядильной машины	RDN-1262*	10	380	1 200	Г20	1 1/4	1,1	0,5
То же, но используемый в качестве привода экструдера	KB-54*	54	220	2 200	Г21	1	0,4	0,2
То же, но используемый в качестве привода печатной машины	CP-25,9*	14,3	380	2 000	Г21	1	0,2	0,1

*Изделия (машины, электрощетки) зарубежного производства.

узла рассматриваемых машин может протекать вполне удовлетворительно. Последнее заключение подтверждается все расширяющейся практикой использования подобных машин в различных отраслях промышленности, таких, как текстильная, трикотажная, бумагоделательная, полиграфическая, пищевая, деревообрабатывающая и др. [Л. 9-20, 9-21].

При выборе электрощеток для коллекторных машин переменного тока им стремятся придать возможно меньшие тангенциальные размеры. Реализация этой тенденции привела к тому, что подобные машины оборудуются сравнительно узкими электрощетками. Их наиболее распространенные размеры таковы: 6,4×10×20 мм; 6,4×20×25 мм; 8×12,5×25 мм; 8×20×25 мм.

Малые размеры поперечного сечения электрощеток вызывают возрастание общего их числа. Так, например, описанные в [Л. 9-19] серии трехфазных двигателей Т и Е, перекрывая диапазон мощностей 1,1—130 кВт, имеют на себе 24—160 электрощеток.

Изложенные сведения об эксплуатационных свойствах электрощеток коллекторных машин переменного тока относились к машинам более или менее значительных размеров и мощностей. Между тем среди машин этого класса находится большое количество типов универсальных двигателей, используемых в приборах бытовой техники, машиносчетных устройствах и электрифицированном ручном инструменте. Эти двигатели имеют вполне определенное назначение, обладают малыми габаритами и массой и им сообщают обычно значительную частоту вращения. Так, например, изготавливаемые в соответствии с ГОСТ 10085-62 коллекторные однофазные электродвигатели, предназначенные для электрифицированного производственного инструмента, обладают характеристиками, проведенными в табл. 9-43. Якоря указанных двигателей должны без повреждения выдерживать в течение 2 мин повышенную частоту вращения не менее 18 000 об/мин. Отмечаемые факторы существенно усложняют работу элементов скользящего контакта машин рассматриваемого назначения, и скорости изнашивания электрощеток и коллекторов у них являются, как правило, повышенными. В английских сообщениях указывается, что скорость изнашивания электроугольных изделий на лучших типах пылесосов, полотеров и т. п. машин считается удовлетворительной, если она составляет величи-

Таблица 9-43

Характеристики коллекторных двигателей переменного тока, встраиваемых в электрифицированный инструмент (ГОСТ 10085-62)

Типы	Мощность, Вт	Частота вращения, об/мин	Напряжение, В	Ток, А, при напряжении 36 В	Ток, А, при напряжении 220 В	К. п. д.
КН11	18	11 600	36; 220	1,9	0,31	0,30
КН12	30			2,6	0,42	0,36
КН13	50			3,5	0,58	0,41
КН21	80			4,9	0,81	0,48
КН22	120			7,0	1,2	0,53
КН23	180			7,9	1,3	0,60
КН31	270			12,5	2,0	0,64
КН32	400			18,8	3,08	0,65
КН33	600			29,4	4,81	0,66
КН41	800			37,6	6,15	0,67

ну порядка 10 мм за 400 ч эксплуатации. На более высокоиспользуемых и более дешевых двигателях электрического инструмента, кофейных мельниц и смесителей приемлемым считается износ 10 мм за 200 ч эксплуатации. Износ коллектора по радиусу, равный 0,5—1,0 мм за 1 000 ч эксплуатации, здесь признают нормальным [Л. 9-22].

Своеобразной является также конструкция щеткодержателей и электрощеток многих малых машин переменного тока. Здесь очень часто используется держатель так называемого патронного типа, в котором размещается электрощетка, несущая на себе цилиндрическую пружину (рис. 9-5). Для того чтобы нажатие на электрощетку по мере ее износа не выходило за пределы рекомендуемых значений, необходимо ее и пружину спроектировать так, чтобы разница в давлении на новое и полностью срабатывавшееся электроугольное изделие была минимальной. Последнюю задачу удается решить, отведя 30—50% общей длины внутреннего гнезда щеткодержателя для размещения в нем тела электрощетки, а остальную часть этой длины заполнить сжатой пружиной. Свободная длина пружины при этом должна не меньше чем в 2,5 раза превосходить ее длину в сжатом состоянии.

При эксплуатации высокооборотных коллекторных электрических машин не следует упускать из виду изложенных ранее рекомендаций по поводу динамики эле-

ментов скользящего контакта. Учитывая подобное обстоятельство, к состоянию рассматриваемых двигателей предъявляются повышенные требования. Так, дебаланс роторов двигателей электрифицированного инструмента,



Рис. 9-5. Щетки для электрических машин, снабженных щеткодержателями патронного типа.

регламентированный ГОСТ 10085-62, не должен превышать следующих значений (табл. 9-44):

Таблица 9-44

Тип двигателя	Допустимый дебаланс, г·см, при		Тип двигателя	Допустимый дебаланс, г·см, при	
	n=3 000 об/мин	n=12 000 об/мин		n=3 000 об/мин	n=12 000 об/мин
КН11	—	0,06	КН23	—	0,16
КН12	—	0,06	КН31	—	0,25
КН13	—	0,10	КН32	—	0,25
КН21	—	0,10	КН33	0,60	0,40
КН22	—	0,16	КН41	0,60	0,40

Жесткими должны быть нормы на допустимый эксцентриситет, биение и другие показатели, определяющие процесс динамического взаимодействия элементов электрического скользящего контакта (гл. 7).

Щетки для электрических машин, эксплуатируемых в особых климатических и других условиях. Среди рассмотренных областей использования электрических скользящих контактов особое место занимали контакты синхронных компенсаторов с водородным охлаждением, контакты погружных электродвигателей и контакты электрических машин летательных аппаратов. В первом и втором из отмеченных случаев имела место замена воздушной среды, окружающей контакт, средой водорода и трансформаторного масла, а в третьем — изменение состояния окружающей среды вызывалось подъемом летательных аппаратов в верхние слои атмосферы. Во всех этих случаях нормальная работа электрооборудования оказывалась возможной либо благодаря применению специальным образом обработанных электрощеток, либо благодаря соответствующему изменению их конструкции. Аналогичным образом решается рассматриваемая задача и в ряде других случаев изменения состояния и состава среды, окружающей контакт. Из их числа наибольший практический интерес представляют случаи эксплуатации электрооборудования в различных географических областях. Низкие температуры районов высоких широт и специфические условия тропиков предъявляют к электрическому скользящему контакту ряд дополнительных требований, главнейшими из которых являются термостойкость, влагостойкость, способность противостоять действию морского тумана и плесневых грибков. Специальными исследованиями, в которых изучалась способность электрощеток удовлетворять перечисленным требованиям [Л. 9-23], установлено, что низкие температуры (порядка —40 °С) не влияют на внешний вид и геометрические размеры электрощеток. При воздействии указанных температур остаются неизменными значения удельного электрического сопротивления и твердости электрощеточных материалов. Циклические изменения температуры от —60 до +120 °С и от —60 до +180 °С и длительное воздействие температуры +120 и +180 °С не оказали влияния на твердость и механическую прочность электрощеток. Что касается удельного электрического сопротивления и геометрических размеров, то при температуре

свыше +120 °C в изделиях, изготовленных из металлсодержащих материалов (материалы I класса), эти характеристики изменяются в сторону увеличения. У электрографитированных электрощеток значения перечисленных характеристик остаются постоянными.

Только что описанные соотношения остаются справедливыми и при возрастании влажности, характерной для районов влажных тропиков. У электрографитированных электрощеток названный фактор не оказывает никакого влияния на удельное электрическое сопротивление, твердость, механическую прочность, внешний вид и габаритные размеры. У электрощеток, изготавливаемых из материалов I класса (т. е. содержащих металл), повышенная влажность вызывает возрастание удельного электрического сопротивления и геометрических размеров.

Пребывание электрощеток в среде, зараженной спорами плесневых грибков, показало, что эта среда не оказывает вредного воздействия на электрощетки.

Изложенные сведения о влиянии климатических факторов относились к материалам, из которых изготовляются электрощетки. Количественная оценка этого влияния, равно как имеющийся опыт эксплуатации электрооборудования в различных климатических районах, свидетельствует о том, что эти материалы сами по себе могут считаться удовлетворяющими предъявляемым к ним дополнительным требованиям. Что касается изготовленных из этих материалов электрощеток, то находящиеся на них металлические элементы армировки и место заделки токоведущего провода в тело изделия оказываются весьма чувствительными к воздействию влажности, высоких температур и морского тумана. При указанных воздействиях происходят интенсивная коррозия армирующих элементов и возрастание переходного сопротивления в месте заделки. С целью предотвращения этих нежелательных явлений арматура электрощеток, предназначенных для использования в районах с тропическим климатом, должна снабжаться защитным покрытием в виде слоя олова (лужение). Зерна медного порошка, используемого при заделке токоведущего провода способом конопатки, принято покрывать слоем серебра.

Влияние климатического фактора на совместную работу элементов электрического скользящего контакта частично освещалось в главах, где речь шла о зависимости характеристик $2\Delta U$, μ и Δh от влажности и температуры.

Для рассматриваемых здесь вопросов обеспечения нормальной работы электрощеток в различных климатических условиях большое значение имеет вопрос о сочетании названных показателей состояния атмосферы. Общеизвестно, что для нормального функционирования электрического скользящего контакта требуется присутствие в атмосфере определенного количества влаги. По мере уменьшения этого количества антифрикционные свойства электрощеточных материалов ухудшаются, а когда содержание влаги упадет ниже некоторого критического предела, работа контакта нарушается: исчезает политура и катастрофически распыляются электрощетки. Нижний предел содержания водяного пара в воздухе первоначально был определен в количестве 4,6 г/м^3. В последующем эта цифра подвергалась уточнению, и в настоящее время считают, что критическое содержание водяного пара лежит в пределах 1—3 г/м^3. Для того чтобы не произошло нарушения нормальной работы элементов электрического скользящего контакта, необходимо, чтобы абсолютная (объемная) влажность окружающего контакт воздуха не снижалась до критического предела, а превышала его. Данные, характеризующие объемную влажность воздуха при его различной относительной влажности и температуре, приведены в табл. 9-45.

При состояниях атмосферы в пределах зоны I, в которой объемная влажность ниже 1 г/см^3, узел токосъема нормально функционировать не может. При состояниях атмосферы в пределах зоны II, в которой объемная влажность колеблется от 1 до 3 г/м^3, скользящий контакт будет работать неустойчиво, и только при состояниях атмосферы, характеризуемых зоной III, когда в 1 м^3 воздуха содержится 3—20 г водяных паров, будет обеспечена нормальная работа деталей узла токосъема. С переходом в зону IV эта работа ухудшается. Работа в последней зоне может иметь место при эксплуатации электрооборудования в районах влажного тропического климата; работа в зоне I может возникнуть в случае использования электрических машин в высокоширотных областях. Последний случай наиболее опасен, так как приводит к форсированному изнашиванию электрощеток. Ликвидировать это явление можно применением пропитанных электрощеточных изделий. Однако практика в данном случае пошла по другому пути: вместо применения пропитанных электрощеток устраняют причину,

Таблица 9-45

Объемная (абсолютная) влажность воздуха, г/м³, при различных значениях относительной влажности

Относительная влажность, %	Температура воздуха, °С														
	—20	—15	—10	—25	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
	Зона I														
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0,11	0,16	0,23	0,34	0,49	0,68	0,94	1,28	1,72	2,29	3,01	3,93	5,08	6,50	8,23
20	0,22	0,32	0,46	0,68	0,98	1,36	1,88	2,56	3,44	4,58	6,02	7,86	10,16	13,00	16,46
25	0,26	0,40	0,58	0,85	1,23	1,70	2,35	3,20	4,30	5,73	7,52	9,83	12,70	16,25	20,58
30	0,33	0,48	0,69	1,02	1,47	2,04	2,82	3,84	5,16	6,87	9,03	11,79	15,24	19,50	24,69
35	0,39	0,56	0,81	1,19	1,71	2,38	3,29	4,48	6,02	8,02	10,53	13,76	17,78	22,75	28,84
40	0,44	0,64	0,92	1,36	1,96	2,72	3,76	5,12	6,88	9,16	12,04	15,72	20,32	26,00	32,92
45	0,50	0,72	1,04	1,53	2,20	3,06	4,23	5,76	7,75	10,31	13,54	17,69	22,86	29,25	37,04
50	0,55	0,80	1,15	1,70	2,45	3,40	4,70	6,40	8,60	11,45	15,05	19,65	25,40	32,50	41,15
55	0,60	0,88	1,26	1,87	2,70	3,74	5,16	7,05	9,46	12,60	16,55	21,62	27,94	35,75	45,29
60	0,66	0,96	1,38	2,04	2,84	4,08	5,54	7,68	10,30	13,74	18,06	23,58	30,48	39,00	49,38
65	0,72	1,04	1,49	2,21	3,81	4,42	6,10	8,32	11,19	14,89	19,56	25,55	33,02	42,25	53,50
70	0,77	1,12	1,61	2,38	3,42	4,76	6,58	8,96	12,04	16,03	21,07	27,51	35,56	45,50	57,61
75	0,83	1,20	1,72	2,55	3,67	5,10	7,05	9,60	12,90	17,18	22,57	29,48	38,10	48,75	61,73
80	0,88	1,28	1,84	2,72	3,92	5,44	7,51	10,24	13,26	18,32	24,08	31,44	40,64	52,00	65,84
85	0,94	1,36	1,95	2,89	4,16	5,78	7,79	10,90	14,60	19,47	25,58	33,41	43,18	55,25	69,96
90	0,99	1,44	2,04	3,06	4,40	6,12	8,45	11,50	15,50	20,51	27,09	35,37	45,72	58,50	74,07
95	1,05	1,52	2,18	3,23	4,65	6,46	8,93	12,15	16,34	21,76	28,59	37,34	48,26	61,25	78,19
100	1,10	1,6	2,3	3,40	4,90	6,80	9,40	12,80	17,20	22,90	30,10	39,30	50,80	65,00	82,30
	Зона II			Зона III						Зона IV					

вызвавшую их износ. Это достигается введением влажного пара в воздушный поток, охлаждающий машину. Впрыскивание влаги менее целесообразно, так как при этом может происходить загрязнение машины.

Еще одним практически важным случаем изменения состава среды, в котором происходит эксплуатация электрооборудования, является случай появления в этой среде кремнийорганических соединений. Источником их выделения могут явиться кремнийорганические изоляционные материалы, использованные при изготовлении электрических машин, смазочные масла с кремнийорганическими добавками и т. п. При термическом старении перечисленных материалов из них выделяются летучие фракции, содержащие кремний, — так называемые силиконы. При циркуляции во внутреннем объеме электрической машины силиконы вступают во взаимодействие с нагретыми частями узла токосъема — электрощетками, коллектором и покрывающей его политурой. Результатом этого взаимодействия является нарушение нормального функционирования скользящего контакта, проявляющееся в катастрофическом (в несколько десятков раз) возрастании скорости изнашивания электрощеток, а в отдельных случаях и в расстройстве коммутационного процесса. Существует несколько гипотез, объясняющих механизм описываемых явлений [Л. 3-13, 9-24 и 9-25]. В своей основе эти гипотезы не являются взаимоисключающими, так как все они признают решающую роль силиконов в рассматриваемом процессе. Подобное обстоятельство является решающим при разработке практических мер улучшения эксплуатационных свойств деталей узла токосъема электрических машин, работающих в атмосфере, содержащей силиконы. Главнейшими из этих мер являются следующие:

1) размещение внутри машины в области щеточно-коллекторного узла веществ, активно поглощающих силиконы; 2) разработка систем и конструкций вентиляции электрических машин, уменьшающих или исключающих возможность попадания в зону скользящего контакта силиконов; 3) рациональный выбор или создание специальных марок электрощеток, способных противостоять воздействиям силиконов и обеспечивающих нормальную работу скользящего контакта.

Возможность использования первых двух способов нормализации работы скользящего контакта должна пре-

дусматриваться на стадии проектирования электрической машины. Иное дело, когда подобная задача решается за счет применения соответствующих электрощеток.

При описании механизма нарушения нормальной работы узла токосъема отмечалась роль силиконов в рассматриваемом процессе и их взаимодействие с коллекторной политурой. Очевидно, если организовать удаление поверхностного слоя политуры, содержащего силиконы, то нарушения работы контакта произойти не должно. Подобное удаление можно осуществлять с помощью электрощеток, изготовив их из материалов, обладающих тонкими полирующими свойствами. К числу таковых относятся электрощеточные материалы на графитовой основе, содержащие зольные примеси (материалы группы IIIГ). Однако поскольку подобные материалы обладают невысокими коммутирующими свойствами, их использование ограничено машинами, малонапряженными в коммутационном отношении; для обеспечения нормальной эксплуатации современных мощных высокоиспользуемых электрических машин, находящихся в среде, содержащей силиконы, необходимо применять электрощетки марок ЭГ74к (СССР), EG123, EG124 и EG206 (Англия). Характеристики перечисленных электрощеточных материалов следующие:

Марка материала	ЭГ74к	EG123	EG124	EG206
Допустимая окружная скорость, м/с	60	30—50	50	50
Номинальная плотность тока, А/см²	12	10	10	10
Удельное нажатие, гПа (гс/см²)	250±50	180	180	180

Опыт использования электрощеток марки ЭГ74к показывает, что они полностью нормализуют работу электрооборудования в среде, содержащей кремнийорганические соединения и средняя скорость их изнашивания в 100 из 140 исследованных случаев не превысила 5 мм/1 000 ч эксплуатации. Скорость изнашивания коллекторов при этом не превышала 0,11 мм/10 000 ч по радиусу [Л. 9-26].

При рассмотрении различных областей использования электрических машин и изложении рекомендаций по выбору пригодных для них электрощеток всегда приводились количественные оценки износных свойств последних. Характеристика износа не является единственным показателем, оценивающим эксплуатационные свойства элементов электрического скользящего контакта. Поскольку получению этой характеристики в соответствии с принятой методикой ее определения предшествует многомесячный период эксплуатации оборудования [Л. 1-4], то, как уже отмечалось ранее, сам факт ее получения свидетельствует о том, что все прочие показатели работы деталей узла токосъема электрических машин удовлетворяют предъявленным к ним требованиям. Приведенные параметры кривых распределения скорости изнашивания электрощеток отражают уровень их развития, и получение описанных здесь значений оказывается возможным во всех случаях, когда обеспечено создание оптимальных условий для работы элементов контакта. Описанию этих условий посвящены гл. 1—8. К сожалению, в практике эксплуатации электрооборудования выполнению этих условий не всегда уделяется достаточное внимание, в результате чего нормальная работа скользящего контакта нарушается. Для устранения возникших нарушений в работе контакта необходимо выявить причины, вызывающие эти нарушения. Значительную помощь в решении этой последней задачи может оказать приводимая далее в приложении III сводка наблюдаемых нарушений в работе элементов скользящего контакта и наиболее вероятных причин, которые эти нарушения вызывают. Зная последние и приняв меры к их устранению, удается нормализовать работу скользящего контакта электрических машин, эксплуатируемых в самых различных областях народного хозяйства.

Таблица переводных множителей некоторых ранее применявшихся единиц измерений в единицы Международной системы СИ

Наименование величины	В старой системе: Единица измерения	В старой системе: Обозначение русское	В старой системе: Обозначение международное	В системе СИ: Единица измерения	В системе СИ: Обозначение русское	В системе СИ: Обозначение международное	В системе СИ: Определение	Переводной множитель
I. Основные единицы								
Длина	метр	*м*	m	метр	м	m	Метр — длина, равная 1650763,73 длин волн в вакууме излучения, соответствующего переходу между уровнями $2p_{10}$ и $5d_5$ криптона-86	1
Масса	килограмм	*кг*	kg	килограмм	кг	kg	Килограмм — единица массы, равная массе международного прототипа килограмма	1
Время	секунда	*сек*	s	секунда	с	s	Секунда — время, равное 9192631770 периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133	1
Сила тока	ампер (международный)	*а*	A	ампер	A	A	Ампер — сила неизменяющегося тока, который, проходя по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого круглого сечения, расположенным на расстоянии 1 м друг от друга в вакууме, вызвал бы между этими проводниками силу, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н на каждый метр длины	1 а межд. = =0,99985A ≈ 1A

Продолжение прилож. I

Наименование величины	В старой системе: Единица измерения	В старой системе: Обозначение русское	В старой системе: Обозначение международное	В системе СИ: Единица измерения	В системе СИ: Обозначение русское	В системе СИ: Обозначение международное	В системе СИ: Определение	Переводной множитель
Термодинамическая температура	градус Кельвина	°K	°K	кельвин	K	K	Кельвин — 1/273,16 часть термодинамической температуры тройной точки воды	$T = 273,16 + t$, где t — температура, °C
II. Производные единицы								
Площадь	квадратный метр	*м²*	m²	квадратный метр	м²	m²	Квадратный метр — площадь квадрата с длиной стороны, равной 1 м	1
Объем, вместимость	кубический метр	*м³*	m³	кубический метр	м³	m³	Кубический метр — объем куба с длиной ребра, равной 1 м	1
Скорость	метр в секунду	*м/сек*	m/s	метр в секунду	м/с	m/s	Метр в секунду — скорость прямолинейно и равномерно движущейся точки, при которой она за время 1 с проходит путь длиной 1 м	1
Ускорение	метр на секунду в квадрате	*м/сек²*	m/s²	метр на секунду в квадрате	м/с²	m/s²	Метр на секунду в квадрате — ускорение прямолинейно и равноускоренно движущейся точки, при котором за время 1 с скорость точки изменяется на 1 м/с	1

Продолжение прилож. I

Наименование величины	В старой системе: Единица измерения	В старой системе: Обозначение русское	В старой системе: Обозначение международное	В системе СИ: Единица измерения	В системе СИ: Обозначение русское	В системе СИ: Обозначение международное	Определение	Переводной множитель
Угловая скорость	оборот в минуту,	*об/мин*	—	радиан в секунду	рад/с	rad/s	Радиан в секунду — угловая скорость равномерно вращающегося тела, при которой за время 1 с совершается поворот тела относительно оси на угол 1 рад	1 об/мин = $\frac{\pi}{30}$ рад/с
Частота	герц	*гц*	Hz	герц	Гц	Hz	Герц — частота, при которой за время 1 с происходит один цикл периодического процесса	1
Сила	килограмм-сила	*кгс*	kgf	ньютон	Н	N	Ньютон — сила, сообщающая телу массой 1 кг ускорение 1 м/с² в направлении действия силы	1 кгс=9,80665 Н ≈ ≈ 10 Н ≈ 1 деканьютон (даН)
Сила тяжести (вес)	грамм-сила	*гс*	gf	»	»	»		1 гс=9,80665·10⁻³ Н ≈ ≈ 0,01 Н ≈ 1 сантиньютон (сН)
Давление Напряжение	килограмм-сила на квадратный метр	*кгс/м²*	kgf/m²	Паскаль	Па	Pa	Паскаль — давление, вызываемое силой 1 Н, равномерно распределенной по поверхности площадью 1 м²	1 кгс/м² = = 1 мм вод. ст. = =9,80665 Па ≈ 10 Па
	миллиметр водяного столба	*мм вод. ст.*	mm H_2O	»	»	»		
	миллиметр ртутного столба	*мм рт. ст.*	mm Hg	»	»	»		

Продолжение прилож. I

Наименование величины	В старой системе: Единица измерения	В старой системе: Обозначение русское	В старой системе: Обозначение международное	В системе СИ: Единица измерения	В системе СИ: Обозначение русское	В системе СИ: Обозначение международное	Определение	Переводной множитель
Давление Напряжение	килограмм-сила на квадратный сантиметр	*кгс/см²*	kgf/cm²	Паскаль	Па	Pa		1 кгс/см² = 1 ат = = 98066,5 Па ≈ ≈ 1 000·10² Па ≈ ≈ 1 000 гПа
	атмосфера техническая	*ат*	at	»	»	»		1 мм рт. ст. = =133,322 Па ≈ 1,33 гПа
Модуль упругости (продольный)	килограмм-сила на квадратный сантиметр	*кгс/см²*	kgf/cm²	Паскаль	Па	Pa	Паскаль — модуль продольной упругости тела, испытывающего удлинение на первоначальную длину при нормальном напряжении 1 Па	1 кгс/см²=98066,5 Па ≈ ≈ 1 000·10² Па= =1 000 гПа
Плотность	килограмм на кубический метр	*кг/м³*	kg/m³	килограмм на кубический метр	кг/м³	kg/m³	Килограмм на кубический метр — плотность однородного тела, имеющего при объеме 1 м³ массу 1 кг	1
Мощность	ватт (международный)	*вт*	W	ватт	Вт	W	Ватт — мощность, при которой работа 1 Дж совершается за время 1 с	1 вт межд. = = 1,00020 Вт ≈ 1 Вт
Плотность тока	ампер (международный) на квадратный метр	*а/м²*	A/m²	ампер на квадратный метр	А/м²	A/m²	Ампер на квадратный метр — плотность равномерно распределенного по поперечному сечению площадью 1 м² электрического тока силой 1 А	∽1

Наименование величины	В старой системе			В системе СИ				Переводной множитель
	Единица измерения	Обозначение		Единица измерения	Обозначение		Определение	
		русское	международное		русское	международное		
Электрическое напряжение. Разность электрических потенциалов	вольт (международный)	*в*	V	вольт	В	V	Вольт — электрическое напряжение, вызывающее в электрической цепи ток силой 1 А при мощности 1 Вт	1 в межд. = =1,00035 В ≈ 1 В
Электрическое сопротивление	ом (международный)	*ом*	Ω	ом	Ом	Ω	Ом — сопротивление проводника, между концами которого при силе тока 1 А возникает напряжение 1 В	1 ом межд. = =1,00050 Ом ≈ 1 Ом
Удельное электрическое сопротивление	ом-метр	*ом·м*	Ω·m	ом-метр	Ом·м	Ω·m	Ом-метр — удельное электрическое сопротивление, при котором цилиндрический прямолинейный проводник площадью сечения 1 м² и длиной 1 м имеет сопротивление 1 Ом	≈1

ПРИЛОЖЕНИЕ II

Наиболее вероятные соотношения значений некоторых характеристик электрического скользящего контакта под электрощетками разной полярности

Сведения о материале коллектора и контактного кольца	Сведения об электрощеточном материале	
	Материал с большим содержанием металла	Материал, не содержащий металла
Коллектор медный	$\Delta U_- > \Delta U^*_+$ $\Delta h_{щ-} < \Delta h_{щ+}$ —	$\Delta U_- > \Delta U_+$ $\Delta h_{щ-} > \Delta h_{щ+}$ $N_- > N_+$
Контактное кольцо из цветного металла	$\Delta U_- < \Delta U_+$ — $\Delta h_{щ-} < \Delta h_+$ —	$\Delta U_- > \Delta U_+$ $\mu_- > \mu_+$ $\Delta h_{щ-} > \Delta h_{щ+}$ $\Delta h_{к-} < \Delta h^{**}_{к+}$
Контактное кольцо из черного металла	— —	$\Delta h_{щ-} > \Delta h_{щ+}$ $\Delta h_{к-} < \Delta h_{к+}$

* Примерно с такой же вероятностью наблюдается и обратное соотношение $\Delta U_- < \Delta U_+$.

** При рассмотрении настоящего соотношения следует помнить, что полярность кольца противоположна полярности соприкасающейся с ним электрощетки.

ПРИЛОЖЕНИЕ III

Диагностика нарушений нормальной работы скользящего контакта электрических машин
(по данным фирмы Ле Карбон Лорен)

Симптомы неудовлетворительной работы	Возможные причины (№), вызывающие их возникновение (см. приводимый ниже перечень)
I. Коллекторные машины	
А. *Электрощетки*	
Вибрируют	6, 15, 17, 21, 22, 27, 33, 49, 50, 53, 57, 62
Скалываются	15, 17, 19, 22, 26, 29, 30, 42, 46, 50, 52, 53, 57, 62
Расслаиваются	11, 16, 18, 22, 26, 34, 44, 53, 57, 66
Перегреваются	5, 11, 20, 23, 24, 25, 32, 33, 34, 36, 44, 47, 53, 57, 60, 63, 68
Зависают	3, 8, 11, 16, 40, 41, 51, 57
Скрипят	6, 15, 17, 33, 49, 53

Симптомы неудовлетворительной работы	Возможные причины (№), вызывающие их возникновение (см. приводимый ниже перечень)
Форсированно изнашиваются:	
равномерно	3, 6, 27 44, 47, 50, 53, 59, 62
неравномерно	5, 10, 11, 16, 25, 34, 36, 44, 47, 53, 59, 64, 68
несимметрично	3, 15, 21, 22, 26, 29, 30, 33, 36, 46, 49, 50, 52, 53, 57, 62, 66
Искрят:	
все электрощетки по контактной поверхности	3, 5, 6, 15, 17, 19, 20, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 32, 33, 34, 36, 44, 47, 49, 50, 51, 53, 57, 60, 62, 63, 64, 69,
отдельные электрощетки на одном или разных бракетах	10, 34
на набегающей грани	21, 22, 26, 29, 42, 46, 52, 56, 62, 66, 67
на сбегающей грани	4, 5, 23, 32, 47, 55, 57, 60, 63, 68, 69
мелкое перемежающееся искрение	10, 15, 17, 19, 21, 22, 25, 27, 29, 33, 46, 49, 52, 53, 55, 62, 64, 66
вылетают искры	4, 5, 17, 22, 26 29, 34, 46, 52, 66, 67
Глянцуется контактная поверхность	25, 32, 43, 68
Подгар и разрушение контактной поверхности	4, 5, 6, 7, 47, 58 (б)
Риски и задиры на боковых гранях	3

Б. *Электрощеточная арматура*

Токоведущий провод:	
перегревается	1, 10, 11, 16, 34, 35, 36, 47, 53
корродирует	4, 5
растрепывается	4, 5, 36, 38, 39, 41
выдергивается	15, 17, 22, 26, 33, 34, 36, 49, 50, 53, 62
Наконечник перегревается	34, 35, 36, 47

Симптомы неудовлетворительной работы	Возможные причины (№), вызывающие их возникновение (см. приводимый ниже перечень)
В. *Коллектор*	
Поверхность скольжения:	
чернеет	1, 5, 10, 25, 26, 28, 32, 34, 47, 50, 51, 53, 64, 68
нагревается	5, 25, 31, 33, 34, 47, 50, 53, 57, 65, 68
деформируется	28, 46, 66
форсированно изнашивается	3, 17, 58 (а), 68
глянцуется	5, 17, 57
покрывается рисками, задирами, бороздками	3, 4, 5, 7, 8, 11, 16, 25, 32, 34, 51, 53, 57, 59
покрывается равномерно расположенными пятнами	68
покрывается неравномерно расположенными пятнами	3, 4, 5, 6, 7, 47, 58 (б)
покрывается бороздками	3, 4, 5, 7, 8, 11, 16, 25, 32, 34, 51, 53, 59
становится полосатой	4, 5, 7, 10, 23, 25, 34, 36, 40, 41, 44, 49, 51, 53, 59
приобретает волнистость	17, 32, 53, 59
Отдельные пластины:	
подгорают	1, 10, 23, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 32, 34, 50, 55, 57, 60, 63, 64, 66, 67, 68
приобретают разную окраску	5, 27, 28, 32, 44, 45, 48, 52, 53, 55, 62, 66, 67
подвергаются эрозионному износу	7, 11, 16, 32, 40, 41, 49, 51, 53, 57

Г. *Щеткодержатель*

Перегревается	3, 34, 55, 58 (б)
На внутренних стенках обоймы образуются риски и задиры	3

Симптомы неудовлетворительной работы	Возможные причины (№), вызывающие их возникновение (см. приводимый ниже перечень)
II. Машины с контактными кольцами	
А. *Электрощетки*	
Скалываются	12, 14, 52, 53, 56, 57, 62, 66
Расслаиваются	11, 16, 18, 53
Перегреваются	2, 5, 8, 10, 11, 20, 31, 33, 35, 36, 53
Зависают	3, 8, 11, 16, 40, 41, 51, 57
Форсированно изнашиваются:	
равномерно	3, 6, 44, 53, 62
неравномерно	5, 10, 11, 34 36, 53
Искрят:	
по всей контактной поверхности	2, 34, 53, 58, 69
по кромке	8, 11, 16, 19, 33, 46, 52, 53, 56, 57, 62, 66, 69
Глянцуется контактная поверхность	37, 39
Б. *Электрощеточная арматура*	
Токоведущий провод:	
перегревается	1, 10, 31, 34, 35, 36
корродирует	4, 5
выдергивается	4, 34, 36, 53, 56, 62
Наконечник:	
перегревается	10, 32, 34, 36
В. *Контактные кольца*	
Подгорают	2, 12, 19, 40, 54, 61
Деформируются	13, 45, 48, 66
Покрываются бороздками	2, 4, 6, 11, 12, 16, 19, 20, 40, 41, 53, 57, 67
Перегреваются	5, 21, 33, 47, 53, 57, 65
Приобретают разную окраску	13, 45, 48, 53, 61, 66
Приобретают волнистость	45, 48, 54, 56, 61, 66
Подвергаются эрозионному износу	7, 11, 16, 19, 20. 32, 40, 41, 51, 53, 57, 67

Приведенные в правой части сводки цифры указывают на возможную причину того или иного нарушения нормальной работы узла токосъема. Причины эти следующие:

1. Зазоры магнитной системы не одинаковы.
2. Воздушное давление под электрощеткой выше атмосферного.
3. Запыленная атмосфера.
4. Атмосфера загрязнена газами, вызывающими коррозию.
5. Атмосфера насыщена химическими веществами.
6. Атмосфера содержит очень мало влаги.
7. Атмосфера содержит очень много влаги.
8. В атмосфере содержатся липкие и клеящие вещества.
9. Между кольцами осаждается электрощеточная пыль.
10. Неравномерное нажатие на электрощетки.
11. Заедание деталей механизма щеткодержателя.
12. Электрощетка свешивается с контактного кольца.
13. Неравномерное расположение электрощеток на кольцах синхронных машин, вызывающее неравномерный нагрев разных участков кольца.
14. На контактной поверхности электрощеток имеются неровности, воспроизводящие неровности поверхности скольжения кольца.
15. Угол наклона реактивных электрощеток мал.
16. Заедание электрощеток в щеткодержателях.
17. Электрощетки слишком твердые.
18. Электрощетки слишком мягкие.
19. Электрощетки слишком тяжелые.
20. Электрощетки имеют слишком большую площадь поперечного сечения (повышенные механические потери).
21. Чрезмерно большой зазор между электрощеткой и обоймой щеткодержателя.
22. Увеличенное расстояние между коллектором и нижней кромкой обоймы щеткодержателя.
23. Намагничивающая сила добавочных полюсов не соответствует требуемым условиям работы.
24. Намагничивающая сила добавочных полюсов слишком велика.
25. Намагничивающая сила добавочных полюсов слишком мала.
26. Местное биение пластин коллектора.
27. На пластинах коллектора совсем не сняты или плохо сняты фаски.
28. Коллекторные пластины замкнуты.
29. Деформация коллектора.
30. На поверхности коллектора плоские места (лыски).
31. Контактное сопротивление электрощеток слишком велико.
32. Контактное сопротивление электрощеток слишком мало.
33. Контактная поверхность электрощеток и коллектора слишком заполирована («остеклена»).
34. Неравномерное распределение тока между параллельно включенными электрощетками.
35. Размеры наконечника токоведущих проводов выбраны неправильно.
36. Размеры токоведущих проводов и их наконечников выбраны неправильно, или они некачественно соединены.
37. Токоведущие провода соприкасаются с контактным кольцом.
38. Материал токоведущих проводов слишком жесткий.

39. Токоведущие провода слишком длинные.
40. Токоведущие провода слишком короткие.
41. Токоведущие провода недостаточно эластичные.
42. Расшатан фундамент машины.
43. Высокое межламельное напряжение.
44. Значительные колебания нагрузки.
45. Местное взаимодействие коллектора с материалом электрощеток при остановке машины.
46. Дебаланс машины.
47. Перегрузки машины.
48. Машина останавливается всегда в одном и том же положении.
49. Машина продолжительное время работает с очень малой или нулевой нагрузкой.
50. Выступает изоляция между коллекторными пластинами.
51. Выбрасывание смазки.
52. Подшипник машины изношен.
53. Несовершенное качество электрощеток.
54. Материал контактного кольца содержит вредные примеси.
55. Периодические изменения (или гармонические составляющие) нагрузочного тока.
56. На поверхности контактного кольца имеются плоские места (лыски).
57. Давление пружин щеткодержателей выбрано неправильно.
58. Давление пружин щеткодержателей завышено (а) или занижено (б).
59. Неправильная установка электрощеток в радиальном направлении.
60. Неправильная расстановка электрощеток по окружности коллектора.
61. Очень большой пусковой ток.
62. Изношенный щеткодержатель.
63. Ширина (размер t) электрощеток выбрана неправильно.
64. Несимметричное расположение электрощеток.
65. Неудовлетворительная вентиляция.
66. Вибрации из-за дефектов в системе передачи.
67. Биение в машине (особенно в машине вертикального исполнения).
68. Дефект обмоток машины.
69. Неправильно выбрана марка щеток.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1-1. Динамомашина в ее историческом развитии. М., Изд-во АН СССР, 1934.

1-2. Электродвигатель в его историческом развитии. М., Изд-во АН СССР, 1936.

1-3. Гусев С. А. Очерки по истории развития электрических машин. М., Госэнергоиздат, 1955.

1-4. Лившиц П. С. Эксплуатация электрощеток в металлургической промышленности. М., «Металлургия», 1966.

1-5. Лившиц П. С. Электрощетки отечественного и зарубежного производства. М., ЦИНТИэлектропром, 1963.

1-6. Лившиц П. С. Контактные материалы в электромашиностроении. М., Информстандартэлектро, 1967.

1-7. Мартин Т. Л. Физические основы электротехники. М., Госэнергоиздат, 1961.

1-8. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М., Гостехиздат, 1957.

1-9. Хольм Р. Электрические контакты. М., Изд-во иностр. лит., 1961.

1-10. Фиалков А. С., Давидович Я. Г. О *p-n* переходе в углеграфитовых материалах. М., «Доклады АН СССР», 1961, № 4.

1-11. Фиалков А. С. Формирование структуры и свойств углеграфитовых материалов. М., «Металлургия», 1965.

1-12. Van Brunt C., Savage R. H. Carbon-Brush contact films. — «General Electric Review», 1944, vol. 47, № 7.

1-13. Такахаси X. Регулирование поверхностной пленки коллектора и защищающая пленка. — «Кенкю Хококу» (японск.), 1954, т. 6, № 2 (ГПНТБ, пер. № МФ 1091064).

1-14. Holm E. Dependence of the conduction mechanism on polarity in stationary and sliding contacts when high-resistivity film is present in the contact. — «IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems», 1965, vol. 84, № 5.

1-15. Parker D. A. The surface properties of copper-graphite sliding contacts. «Conference on Commutation in Rotating Machines». Institution Electrical Engineering, 1964, London.

1-16. Иоффе А. Ф. Полупроводники в современной технике. М., Изд-во АН СССР, 1956.

1-17. Иоффе А. Ф. Физика полупроводников. М., Изд-во АН СССР, 1957.

1-18. Лившиц П. С. Классификация и оценка свойств продукции электрощеточного производства. Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. М., 1958 (Московский институт цветных металлов и золота).

1-19. Лившиц П. С. Некоторые закономерности изменения свойств контактных материалов, изготовляемых методами порошковой металлургии. — «Порошковая металлургия», 1966, № 11.

2-1. Радиофизическая электроника. Под ред. Н. А. Капцова. М., Изд-во МГУ, 1960.

2-2. Padmanabhan K., Srinivason A. Some important aspects in the phenomen of commutator sparking. — «IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems», 1965, vol. 84, № 5.

2-3. Нейкирхен И. Угольные щетки и причины непостоянства условий коммутации машин постоянного тока. М., ОНТИ, 1937.

3-1. Лившиц П. С. Щетки для электрических машин. М., Госэнергоиздат, 1961.

3-2. Вегнер О. Г. Теория и практика коммутации машин постоянного тока. М., Госэнергоиздат, 1961.

3-3. Mayeur R. Contribution a l'etude des contacts glissants.— «Revue general de L'Electricite», 1955, vol. 64, № 1.

3-4. Карасев М. Ф. Коммутация коллекторных машин постоянного тока. М., Госэнергоиздат, 1961.

3-5. Гейнрих В. Проблема скользящего контакта в электромашиностроении. М., Энергоиздат, 1933.

3-6. Neukirchen I. Mulden, Bander und Reifen als typische Verschleissformen auf dem Stromwender und Schleifringen elektrischer Maschinen. Aus dem Prüffeld der Ringsdorf-Werke, 1954, H. 19.

3-7. Неллин В. И. О полярных свойствах электрических щеток. — «Труды Томского электромеханического института инженеров транспорта», 1957, т. XXIV.

3-8. Фиалков А. С., Вилькин М. А. Исследование скользящего контакта при работе щеток на углеграфитовых коллекторах.— «Электротехника», 1963, № 9.

3-9. Карасев М. Ф., Серегин В. А., Туркин В. В. Влияние температуры на величину падения напряжения в щеточном контакте и на условия коммутации. — «Труды Омского института инженеров железнодорожного транспорта», 1968, т. 88, вып. 2.

3-10. Пеньков В. А., Костюк А. П. Об образовании окисной пленки на поверхности меди. — «Украинский химический журнал», 1960, т. XXVI, вып. 1.

3-11. Davies W. The sliding contact of graphite and copper. The Institution of Electricals Engineers. Monograph. 1957, № 271.

3-12. Линн С., Ельсей Н. Влияние поверхностной пленки на коммутацию. Пер. Всесоюзной торговой палаты, № 3764, 1956.

3-13. Лившиц П. С., Крылов Ю. С., Петросян Л. С. Особенности работы скользящего контакта электрических машин с кремнийорганической изоляцией. МЭТП СССР. М., Информстандартэлектро, 1966.

3-14. Фиалков А. С. Технология и оборудование электроугольного производства. М., Госэнергоиздат, 1958.

3-15. Watson A. F. Factors influensing bruch stability. — «Proceedings of the First Carbon Bruch Conference». Morganite Carbon. Ltd. London, 1961, S. 1.

3-16. Власенко Н. В., Лопата А. С., Завгородняя Т. И. Предварительные результаты исследований скользящего электрического контакта машин постоянного тока в жидкой изолирующей среде. — В кн.: Коммутация машин постоянного тока. Омск, Западно-Сибирское книжное изд-во, 1965.

3-17. Плющ Б. М., Рыскин Л. Л. Работа скользящего контакта двигателей постоянного тока в среде жидкого диэлектрика. — «Электротехника», 1965, № 10.

3-18. Рыскин Л. Л. Исследование коммутаций маслонаполненных машин постоянного тока применительно к погружным электроприводам. Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. н. Баку, 1967 (Азербайджанский институт нефти и химии).

3-19. Плющ Б. М., Бреслав В. М., Рыскин Л. Л. Коллекторные характеристики щеток в среде жидкого диэлектрика и коммутация маслонаполненных машин постоянного тока. — В кн.: Четвертая всесоюзная научно-техническая конференция по коммутации машин постоянного тока. Омск, 1968.

4-1. Буткевич Ю. В. О некоторых явлениях, сопровождающих работу щетки. — «Вестник теоретической и экспериментальной электротехники», 1928, № 8.

4-2. Lancaster I. K. and Stanley I. W. The effect of current on the friction of carbon brush materials. — «British Journal of Applied Physics», 1964, vol. 15, № 1.

4-3. Крагальский И. В., Щедров В. С. Развитие науки о трении. М., Изд-во АН СССР, 1956.

4-4. Glass S. W. The measurement of the frictional characteristics of brushes. — «Iron and Steel Engineer», 1937, v. XIV, № VII.

4-5. Stanley I. W. The effect of surface temperature on the friction of electrographite on copper.—«British Journal of Applied Physics», 1966, vol. 17, № 6.

4-6. Millet M. J. Les Balais. — «Bulletin de la Societe Francaise des Electriciens», 1964, Serie 8, v. 5, № 51.

4-7. Фиалков А. С., Вилькин М. А. Работа щеток марки ВТ5 в условиях больших высот.—«Вестник электропромышленности», 1962, № 1.

4-8. Аткинс Б. Р., Гриффитс Д. П. Поведение электрических скользящих контактов на больших высотах. — В кн.: «Доклады Лондонской конференции по смазке и износу». (Пер. Л. Ю. Пружанского), М., Изд-во иностр. лит., 1959.

4-9. Societe le Carbon-Lorraine. (Paris). Improvements in or relating to carbon brushes for electrical machines. Pat. № 991692, Англия, кл. F2A.

4-10. Lenz R., Joachim W. Mit Harz imprägnierte Kohlebürste für elektrische Maschinen. Pat № 1205612, ФРГ, кл. 21d, 63/01.

5-1. Wagner K., Lenz R., Brutschin F., Scherlart H. Radioaktive Untersuchungen der Stoffübertragung zwischen Kupfer—Graphit—Bürsten und einem Kupferrotor.—«Elektrie», 1964, Bd 18, № 8.

5-2. Морита Яшик, Енедзава Ясу. Повреждения контактных колец и износ щеток. — «Мицубиси Денки», 1958, т. 32, № 6 (японск.).

5-3. Крагельский И. В. Трение твердых тел. М., «Наука», 1964.

5-4. Старосельский А. А., Гаркунов Д. Н. Долговечность трущихся деталей машин. М., «Машиностроение», 1967.

5-5. Покровский Г. И. Физика взрыва. М., «Знание», 1954.

5-6. Binder K. Verschleiss von Kohlenbürsten durch Kommutierungslichtbögen. — «Elektrotechnische Zeitschrift». Ausgabe A. 1964, Bd 85, № 8.

5-7. Нэллин В. И., Богатырев Н. Я., Ложкин Л. В., Туктаев И. И., Михеев В. П. Механика скользящего контакта. М., «Транспорт», 1966.

5-8. Thompson E., Turner B. Discussion. Proceeding of the First Carbon Brush Conference. London, 1961.

5-9. Duncan D. L. W. Brushes for steel mile applications. Morganite Exports Ltd, 1967.

5-10. Campbell, Kosak. The wear of carbon brushes in dry atmospheres. — «Transactions of ASME», 1948, vol. 70, № 5.

5-11. Summers E. R., Settle I. F. New test chambers for aircraft electric apparatus with particular reference to carbon brushes.— «AIEE Transactions», 1944, vol. 63, XI.

5-12. Степанов В. П., Глускин Я. А. и др. Работа щеток на контактных кольцах мощных синхронных компенсаторов с водородным охлаждением. — «Электрические станции», 1967, № 12.

5-13. Ramadanoff D. Kohlenstoffbürste. Pat. ФРГ, № 961461, кл. 21d', 63/01.

5-14. Hinrichs G., Weiss R. Imprägnierte Bürsten für elektrische Maschinen. Pat. ФРГ, № 1090304, кл. 21d', 63/01.

5-15. Elsey H. M., Kohlebürste. Pat. ФРГ, № 813729, кл. 21d'. 63/01.

5-16. Мосиашвили О. Я. Применение металлокерамических изделий в сварочных преобразователях. — «Электротехника», 1965, № 2.

5-17. Альтман А. Б. О применении металлокерамических материалов для коллекторов электрических машин. — В кн. Электрические контакты. М., «Энергия», 1967.

5-18. Bobka R. I. Chemical characteristics of carbon brush wear dust. Proceedings of the Fifth Conference on Carbon, vol. 2, Pergamon Press, New-York — Oxford — London — Paris, 1963.

6-1. Оптимальная коммутация машин постоянного тока. М., «Транспорт», 1967.

6-2. Дальнейшее развитие теории оптимальной коммутации машин постоянного тока. — «Труды Омского института инженеров железнодорожного транспорта», 1967, т. 78.

6-3. Карасев М. Ф., Козлов В. Н. Методы определения коммутирующей способности щеток. — В кн.: Вопросы коммутации коллекторных электрических машин. Омск, Западно-Сибирское книжное изд-во, 1964.

6-4. Schröter F. Die Kommutierungsfähigkeit der Kohlebüste.— «Elektrotechnische Zeitschrift», Ausgabe B. 1962, Bd 14, Heft 3.

6-5. Лившиц П. С. Об оценке коммутирующих свойств электрощеточных материалов. — «Электричество», 1958, № 1.

6-6. Бодров И. И., Кубарев В. Е. Наладка коммутации генераторов ПБК 215/40 преобразовательных агрегатов прокатных станов. Минчермет СССР. Центральный научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований черной металлургии. Бюллетень № 17 (565), 1967.

6-7. Менделеев И. С. Влияние полярности главных полюсов на коммутацию и нагрев машин постоянного тока. — «Вестник электропромышленности», 1958, № 6.

6-8. Неболюбов Ю. Е. Коммутация коллекторных машин переменного тока. Фрунзе, «Илим», 1965.

6-9. Schröter F. Влияние температуры на скользящий контакт. — «Elektrotechnische Zeitschrift», Ausgabe A, 1964, Bd 85, № 18.

6-10. Fifer W. Insulation in large rotating machinery user experience. — «National conference on the application of electrical insulation». NEMA a AIEE. Third annual. Chicago, 1960.

6-11. Фрумин В. Л. Исследование скользящего контакта и коммутации в среде жидкого диэлектрика. Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Харьков, 1967 (ХПИ).

7-1. Бабаджанян П. А., Люсин Б. И. Конструкция и производство коллекторов электрических машин. М., Госэнергоиздат, 1960.

7-2. Бертинов А. И., Ризник Г. А. Проектирование авиационных электрических машин постоянного тока. М., Оборонгиз, 1958.

7-3. Swoyer H. S. Commutator and slip ring maintenance.— «IEEE Transactions on Industry and General Applications», 1965, vol. 1, № 5.

7-4. Фиш А. Я., Тарнопольский Ю. М., Акунц К. А., Петров А. В. Коллекторы электрических машин на пластмассе. М., Госэнергоиздат, 1963.

7-5. Глускин А. Я. Некоторые вопросы токосъема автомобильных генераторов. — В кн.: Исследование работы автомобильного электрооборудования. Вып. 1. М., Машгиз, 1959.

7-6. Дридзо М. Л. Об условиях безотрывного движения скользящего контакта электрических машин. — «Электротехника», 1967, № 6.

7-7. Дридзо М. Л. Оценка тангенциальных сил щеточноколлекторного узла электрических машин постоянного тока. — «Известия вузов. Электромеханика», 1969, № 4.

7-8. Намитоков К. К., Брезинский В. Г., Кац Б. Б. Эксцентриситет коллектора машин постоянного тока при высоких скоростях вращения. — «Электротехника», 1965, № 4.

7-9. Ложкин Л. В., Жартовский Г. С. Вибрация щеточного узла коллекторных электрических машин. — «Электротехника», 1966, № 10.

7-10. Volkmann W. Uber den Einfluss der Reibungskräfte auf das dynamische Laufverhalten der Kohlebürsten.—«Elektrotechnische Zeitschrift». Ausgabe A, 1964, Bd 85, № 6.

7-11. Асаи Ионэсиро, Нагано Иосио. Влияние технологии изготовления на характеристики угольных электрощеток. — «Танко карбон», 1966, № 45 (японск.).

7-12. Chmelik K. Hluk Kartacu elektrickych Stroju. — «Elektrotechnik», 1967, sv. 22, № 1.

7-13. Nelson R. E., Diehl I. E. Radio interference from carbon-brush operation. — «Electro-Technology», 1963, vol. 72, № 1.

8-1. Arnold E. Der Kontaktwiderstand von Kohlen und Kupferbürsten und die Temperaturerhöhung eines Kollektors. — «Elektrotechnische Zeitschrift», 1899, Januar, № 1.

8-2. Hayes M. E. Current-collecting brushes in electrical machines. London, Pitman, 1947.

8-3. Костенко М. П., Пиотровский Л. М. Электрические машины. Ч. 1. М.—Л., Госэнергоиздат, 1958.

8-4. Marshall R. A. Design of brush gear high current pulses and high rubbing velocities. — «IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems», 1966, vol. 85, № 11.

8-5. Амбарцумов Т. Г., Коварский Е. М., Гершкович Г. И. О возможности повышения допустимой плотности тока под электрощетками.—«Вестник электропромышленности», 1958, № 10.

8-6. Менделеев И. С., Кац Б. Б. Влияние плотности тока под щетками на коммутацию машин постоянного тока. — «Известия вузов. Электромеханика», 1967, № 3.

8-7. Яковенко В. А. О повышении плотности тока под щет-

ками в машинах постоянного тока. — «Электротехника», 1963, № 9.

8-8. Teruhisa S. Sliding contact characteristic of brushes. «Фудзи Дзихо» (японск.), 1958, № 2.

8-9. Анисимов Я. Ф. О повышении плотности тока в скользящем контакте электрических машин. — «Известия вузов. Электромеханика», 1966, № 4.

8-10. Волошин И., Бару Ю. Влияние условий работы скользящего контакта на неравномерность токораспределения между параллельно работающими электрическими щетками. — «Электротехническая промышленность». Информэлектро, 1969, вып. 333.

8-11. May M. S. Current density in carbon brushes. — «Electrical Engineering», 1962, vol. 8, № 3.

8-12. Shobert E. I. Calculation of temperature transients in carbon brushes. — «IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems», 1968, vol. 87, № 10.

8-13. Рубаненко И. Р., Гроссман М. И. Распределение тепла между щетками и коллектором. — «Электротехника», 1969, № 4.

8-14. Толкунов В. П. О выборе величины плотности тока в машинах постоянного тока малой и средней мощности. — «Электричество», 1962, № 8.

8-15. Толкунов В. П. Рациональный выбор плотности тока и ширины щетки в машинах постоянного тока. — «Известия вузов. Электромеханика», 1962, № 4.

8-16. Глускин А. Я., Бордаченков А. М., Степанов В. П Работа щеточного контакта электрических машин при повышении плотности тока. — «Известия вузов. Электромеханика», 1963, № 9.

8-17. Яковенко В. А. О выборе оптимальной плотности тока под электрощетками. — В кн.: Электромашиностроение и электрооборудование (Республиканский межведомственный научно-технический сборник). Харьков, 1967, вып. 6.

8-18. Holm R. Theorie der ungleichen Stromverteilung im Kontakt zwischen Kohlebürsten und Schleifringen aus Kupfer oder Stahl in Zuft. — «Elektrotechnische Zeitschrift», Ausg. A. 1960, Bd 81, H. 16.

8-19. Давидович Я. Г., Глускин А. Я. Щетки для современных электрических машин. — В кн.: Новое в электроугольном производстве. М., Информстандартэлектро, 1969, вып. 3.

9-1. Cook T. H., Loco E. Brushes for general industrial applications including hydro-electric and high speed turbogenerators. — Morganite export Ltd.», 1967, September, London.

9-2. Глускин А. Я., Зайчиков В. Г., Крылов Ю. С. О работе щеток на контактных кольцах турбогенераторов. — «Труды Всесоюзного научно-исследовательского и проектно-технологического института электроугольных изделий». Т. 1. М., «Энергия», 1970.

9-3. Pattison R., Clark E., Berger B. Carbon brushes performance. — «Electrical Times», 1965, vol. 148, № 16.

9-4. Rerat S. Problemes de commutation interessant les grosses dynamos debitant sur des cuves d'aluminium. — «Bulletin de la Societe Francaise des electricients», 1964, vol. 5, № 51.

9-5. Забродин В. В. и др. Транспортное электрооборудование. — В кн.: Электротехническая промышленность СССР. М., Информстандартэлектро, 1967.

9-6. Антонов А. К. Пятьдесят лет советской электротехнической промышленности. — В кн.: Электротехническая промышленность СССР. М., Информстандартэлектро, 1967.

9-7. Лившиц П. С., Фирштенберг В. Н. Характеристики и области применения электрощеток отечественного и зарубежного производства. М., Информстандартэлектро, 1967.

9-8. Cook T. H., Loco E. Brushes for railway traction motors and for traction auxiliary machines. — «Morganite Exports Ltd.», 1967, September, London.

9-9. Бордаченков А. М., Скворцова М. Я. Перспективы внедрения новых электрощеток для тяговых электрических машин железнодорожного транспорта. — В кн.: Перспективы внедрения новых износоустойчивых электрощеток и их влияние на условия работы щеточно-коллекторного узла. М., Информэлектро, 1969.

9-10. Morganite Brush Grades and characteristics. Application data. Ref. № ADS 1. November 1971. Morganite Carbon Ltd. London.

9-11. Мезин Е. К. Судовые электрические машины. М., «Транспорт», 1964.

9-12. Китаенко Г. И., Коськин Ю. П. Источники электроэнергии на судах. — «Судовая электротехника и связь», 1967, вып. 36, 37.

9-13. Ницай В. Е. Электропривод. — «Судовая электротехника и связь», 1967, вып. 36, 37.

9-14. Власов Г. Д. Проектирование систем электроснабжения летательных аппаратов. М., «Машиностроение», 1967.

9-15. Лукин И. И. Системы электроснабжения летательных аппаратов гражданской авиации. Ч. 1. Киев, 1967, (Институт инженеров гражданской авиации).

9-16. Бертинов А. И. Электрические машины авиационной автоматики. М., Оборонгиз, 1961.

9-17. Авиаэкспорт. Авиационное электрооборудование. Каталог, изд. 1964.

9-18. Cook T. H., Loco E. Brushes for use in low humidity conditions in silicone vapour and hydrogen. — «Morganite Export Ltd.», 1967, September, London.

9-19. Костенко М. П., Гнедин Л. П. Теория и расчет трехфазных коллекторных машин и каскадных систем. М., «Наука», 1964.

9-20. Бодров И. и др. Новые электрощеточные материалы для крупных электрических машин постоянного тока и коллекторных электродвигателей переменного тока. — «ЭП. Электротехнические материалы», Информэлектро, 1971, вып. 13.

9-21. Бодров И. Эксплуатация узлов токосъема электродвигателей Шраге — Рихтера. — «Электротехническая промышленность», Информэлектро, 1969, вып. 334.

9-22. Bates C. Fractional horse power motor brushes. — «Morganite Export Ltd.», 1967, September, London.

9-23. Савета А. Л., Энтин М. А. Работоспособность серийных электрощеток в условиях тропического климата. — «Новое в электроугольном производстве». М., 1969, вып. 4.

9-24. Фридман Г. Н. Воздействие кремнийорганических полимеров на скользящий контакт в коллекторных электрических машинах. — «Электротехника», 1970, № 8.

9-25. Brush for operation in totaly enclosed motors with class H insulation. — «Carbon on its Uses», 1962, vol. 10, № 5.

9-26. Некоторые итоги эксплуатации электрощеток марки ЭГ74К. — «Электротехническая промышленность. Электрические машины», 1970, вып. 1.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3
Введение 6
Глава первая. Электрический скользящий контакт. Контактные материалы и их свойства 13
Глава вторая. Физико-химические процессы в электрическом скользящем контакте 24
Глава третья. Переходное падение напряжения в электрическом скользящем контакте 34
Глава четвертая. Коэффициент трения между элементами электрического скользящего контакта 51
Глава пятая. Износ элементов электрического скользящего контакта 61
Глава шестая. Коммутирующие свойства 89
Глава седьмая. Динамика взаимодействия элементов электрического скользящего контакта 115
Глава восьмая. Оптимальный режим работы скользящего контакта электрических машин 131
Глава девятая. Обеспечение нормальной работы скользящего контакта электрических машин 147
Приложение I. Таблица переводных множителей некоторых ранее применявшихся единиц измерений в единицы Международной системы СИ 254
Приложение II. Наиболее вероятные соотношения значений некоторых характеристик электрического скользящего контакта под электрощетками разной полярности . . . 259
Приложение III. Диагностика нарушений нормальной работы скользящего контакта электрических машин . . . 259
Список литературы 265

Цена 95 коп.